О.Ф.КАБАРДИН

ФИЗИКА



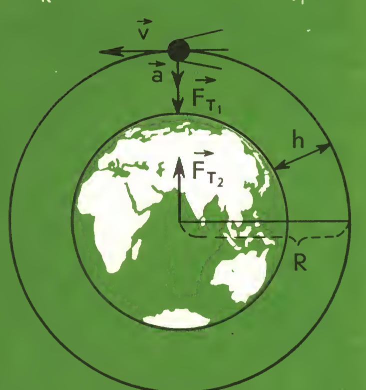
Справочные материалы

ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

$$a = \frac{v^2}{R} = g \qquad v = \sqrt{Rg} \qquad a = \frac{F_T}{m} = G\frac{M}{R^2}$$

$$\frac{v^2}{R} = G\frac{M}{R^2} \qquad v = \sqrt{G\frac{M}{R}}$$

$$E_p + E_k = \text{const} \qquad \vec{F}_{T_1} = -\vec{F}_{T_2}$$



$$h \ll R, \quad g \approx \text{const}$$

$$E_p = mgh \qquad E_k = \frac{mv^2}{2}$$

РАБОТА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА



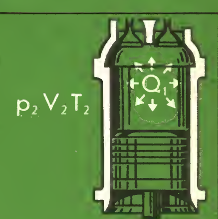
$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$$

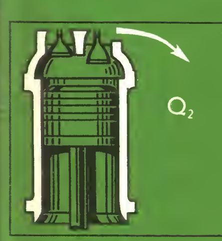
$$p = \frac{2}{3} n \overline{E}$$

$$p = nkT$$

$$pV = \nu RT$$

$$\frac{pV}{T} = \nu R = const$$





$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$A' = Q_1 - Q_2$$

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

О

С

М

уч
дл

Р
Г
ко
по
об

3-

М
«Г
19

О.Ф.КАБАРДИН

ФИЗИКА

Справочные материалы

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ УЧАЩИХСЯ

Рекомендовано Государственным комитетом СССР по народному образованию

3-е издание

МЕХАНИКА

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ЭЛЕКТРО-ДИНАМИКА

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

ПРИЛОЖЕНИЯ

МОСКВА
«ПРОСВЕЩЕНИЕ»
1991

ББК 22.3я2я72
К12

Рецензенты:

доктор философских наук, доцент МГУ *Г. Я. Мякишев*;
учитель физики средней школы № 56,
канд. физ.-мат. наук *Е. И. Африна*

В пособии дается краткое систематическое изложение основного содержания школьного курса физики с VII по XI классы. Оно предназначается учащимся старших классов и окончившим среднюю школу для самостоятельных занятий при повторении изученного ранее материала и при подготовке к экзамену по физике.

Последовательность рассмотрения отдельных тем и группировка некоторых вопросов в пособии отличаются от принятых в учебниках, так как книга рассчитана на использование после изучения соответствующих разделов курса физики в школе. Материал, выделяемый в отдельный параграф, как правило, соответствует одному вопросу экзаменационного билета.

После прочтения параграфа следует проверить понимание и запоминание определений основных физических понятий и величин, понимание физического смысла и запоминание формулировок законов. Затем нужно обратить внимание на алгебраическую форму записи связи между различными физическими величинами и воспроизвести запись формул по памяти.

Изучение каждого раздела курса физики следует завершить решением задач.

Прочитав условие задачи из раздела «Примеры решения задач», нужно попытаться решить задачу самостоятельно и сравнить свое решение с приведенным в книге. Если при попытке самостоятельного решения задачи возникнут затруднения, можно рассмотреть образец ее решения.

Если необходимо повторить определенный раздел школьной программы, то соответствующий материал можно отыскать, пользуясь оглавлением.

Кабардин О. Ф.

К12 **Физика: Справ. материалы: Учеб. пособие для учащихся.— 3-е изд.,— М.: Просвещение, 1991.— 367 с.: ил.— ISBN 5-09-003008-1.**

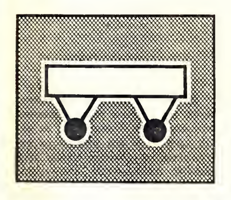
В книге дано краткое изложение основных разделов школьного курса физики: механики, молекулярной физики, электродинамики, колебательных и волновых процессов, квантовой физики. Книга призвана оказать помощь в систематизации и обобщении знаний по курсу физики VII—XI классов, что нашло свое отражение в ее содержании и структуре.

$К \frac{4306020000-196}{103(03)-91}$ 127—91

ББК 22.3я2я72

ISBN 5-09-003008-1

МЕХАНИКА



1. Механическое движение . 4
2. Равноускоренное движение 8
3. Равномерное движение по окружности 12
4. Первый закон Ньютона . 14
5. Масса тела 15
6. Сила 18
7. Второй закон Ньютона . 19
8. Третий закон Ньютона . 20
9. Закон всемирного тяготения 21
10. Вес и невесомость . . . 24
11. Движение тел под действием силы тяжести . . . 26
12. Сила упругости . . . 28
13. Силы трения 29
14. Условия равновесия тел . 31
15. Элементы гидростатики . 35
16. Закон сохранения импульса 40
17. Реактивное движение . . 41
18. Механическая работа . . 43
19. Кинетическая энергия . . 44
20. Потенциальная энергия . 45
21. Закон сохранения энергии в механических процессах 48

Примеры решения задач . . 56

Задачи для самостоятельного решения 65

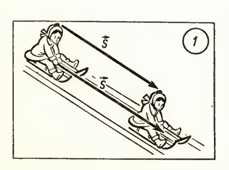
1. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Механическим движением тела называется изменение его положения в пространстве относительно других тел с течением времени.

Механическое движение тел изучает *механика*. Раздел механики, описывающий геометрические свойства движения без учета масс тел и действующих сил, называется *кинематикой*.

Путь и перемещение. Линия, по которой движется точка тела, называется *траекторией движения*. Длина траектории называется пройденным путем. Вектор, соединяющий начальную и конечную точки траектории, называется *перемещением*.

Движение тела, при котором все его точки в данный момент времени движутся одинаково, называется *поступательным движением*. Для описания поступательного движения тела достаточно выбрать одну точку и описать ее движение (рис. 1).



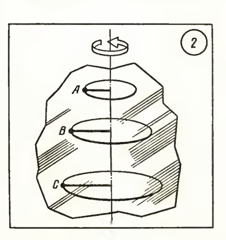
Движение, при котором траектории всех точек тела являются окружностями с центрами на одной прямой и все плоскости окружностей перпендикулярны этой прямой, называется *вращательным движением* (рис. 2).

Поступательное и вращательное движения — самые простые примеры механического движения тел.

При движении автомобиля по дороге его кузов движется поступательно, а колеса совершают вращательное движение относительно осей.

Материальная точка. Тело, размерами которого в данных условиях движения можно пренебречь, называют *материальной точкой*.

Тело можно рассматривать как материальную точку, если его



размеры малы по сравнению с расстоянием, которое оно проходит, или по сравнению с расстояниями от него до других тел. Космический корабль, пролетающий 8 км за 1 с, при наблюдении с поверхности Земли вполне можно рассматривать как материальную точку. Но космонавт, находящийся в космическом корабле, не может считать свой корабль материальной точкой.

Когда траекторией движения материальной точки является прямая линия и направление движения не изменяется, модуль вектора перемещения равен пройденному пути. Если точка движется по криволинейной траектории, то модуль вектора перемещения меньше пройденного пути (рис. 3).

Если в конкретных условиях тело можно рассматривать как материальную точку, мы будем говорить о координатах тела и траектории движения тела.

Метр. Для определения координат тела необходимо уметь измерять расстояние на прямой между двумя точками. Любой процесс измерения физической величины заключается в сравнении измеряемой величины с единицей измерения этой величины. Единица для измерения длины может быть выбрана произвольно, но для удобства в науке и технике, в торговле и в быту в настоящее время условились во всех странах пользоваться одной единицей длины — *метром.*

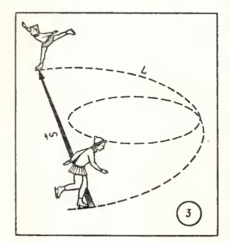
Эталон единицы длины — метр — изготовлен из очень прочного сплава иридия и платины. Метр равен примерно $\frac{1}{40\,000\,000}$ части земного меридиана.

По современному определению метр — это расстояние, которое свет проходит в пустоте за 1/299 792 458 долю секунды. Таким образом, современное определение единицы расстояния связано с определением единицы измерения времени — секундой.

Секунда. Для измерения времени выбирается какой-либо природный периодический процесс или процесс, регулярно повторяющийся в специально изготовленном приборе — часах.

До недавнего времени основой для измерения времени служили астрономические наблюдения за движением Солнца и звезд. Суточное движение Солнца и звезд происходит из-за вращения Земли вокруг своей оси.

Сутки делятся на 24 часа, 1 час — на 60 минут, 1 минута — на 60 секунд; поэтому 1 секунда равна $1/24 \cdot 60 \cdot 60$ доле суток. Длительность суток определялась из астрономических наблюдений. Однако точные современ-

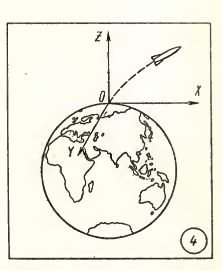


ные часы позволяют обнаружить, что из-за изменения направления ветров и океанских течений, из-за влияния приливов вращение Земли вокруг своей оси то ускоряется, то замедляется. Строго повторяющимися являются периодические процессы в мире атомов. Поэтому для точных измерений времени используются атомные часы. Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения атома цезия при переходе между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния.

В Международной системе единиц (СИ) длина и время приняты за независимые от других величины. Подобные величины называются *основными*. Длина и время — основные величины в Международной системе единиц, они используются для определения других величин этой системы.

Система отсчета. Относительность механического движения. Чтобы описать механическое движение тела (точки), нужно знать его координаты в любой момент времени. Для определения координат материальной точки следует прежде всего выбрать *тело отсчета* и связать с ним *систему координат*. В механике часто телом отсчета служит Земля, с которой связывается прямоугольная декартова система координат (рис. 4). Для определения положения материальной точки в любой момент времени необходимо также задать начало отсчета времени.

Система координат, тело отсчета, с которым она связана, и указание начала отсчета времени



образуют *систему отсчета*, относительно которой рассматривается движение тела.

Траектория движения тела, пройденный путь и перемещение зависят от выбора системы отсчета. Другими словами, *механическое движение относительно*.

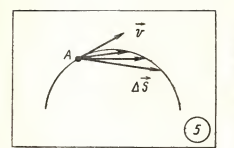
Скорость. Для количественной характеристики процесса движения тела вводится понятие скорости движения.

Мгновенной скоростью поступательного движения тела в момент времени t называется отношение очень малого перемещения $\Delta\vec{s}$ к малому промежутку времени Δt, за который произошло это перемещение:

$$\vec{v}=\frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t}. \qquad (1.1)$$

Мгновенная скорость — векторная величина.

При последовательном уменьшении длительности промежутка времени Δt направление вектора перемещения $\Delta\vec{s}$ приближается к



касательной в точке A траектории движения, через которую проходит тело в момент времени t (рис. 5). Поэтому вектор скорости $\vec{v}$ лежит на касательной к траектории движения тела в точке A и направлен в сторону движения тела.

Формула (1.1) позволяет установить единицу скорости.

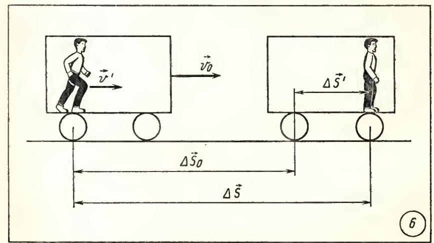
В Международной системе (СИ) единицей расстояния является метр, единицей времени — секунда; поэтому скорость выражается в *метрах в секунду*:

$$\frac{1\ \text{м}}{1\ \text{с}} = 1\ \text{м / с}.$$

Метр в секунду равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой точка за время 1 с перемещается на расстояние 1 м.

Равномерное прямолинейное движение. Движение с постоянной по модулю и направлению скоростью называется *равномерным прямолинейным движением*. При равномерном прямолинейном движении тело движется по прямой и за любые равные промежутки времени проходит одинаковые пути.

Классический закон сложения скоростей. Выясним, как связаны между собой скорости движения тела в различных системах отсчета. Рассмотрим такой пример. Вагон движется по прямолинейному участку железнодорожного пути равномерно со скоростью $\vec{v}_0$ относительно Земли. Пассажир движется относительно вагона со скоростью $\vec{v}'$, векторы скоростей $\vec{v}_0$ и $\vec{v}'$ имеют одинаковое направление. Найдем скорость пассажира относительно Земли. Перемещение пассажира относительно Зем-



ли $\Delta\vec{s}$ за малый промежуток времени Δt равно сумме перемещений за этот промежуток времени вагона относительно Земли $\Delta\vec{s}_0$ и пассажира относительно вагона $\Delta\vec{s}'$ (рис. 6):

$$\Delta\vec{s}=\Delta\vec{s}_0+\Delta\vec{s}'$$

$$\text{или } \Delta\vec{s}=\vec{v}_0\Delta t+\vec{v}'\Delta t.$$

Отсюда скорость пассажира относительно Земли $\vec{v}=\frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t}$ равна

$$\vec{v}=\vec{v}_0+\vec{v}'. \qquad (1.2)$$

Мы получили, что скорость $\vec{v}$ пассажира в системе отсчета, связанной с Землей, равна сумме скоростей $\vec{v}'$ пассажира в системе отсчета, связанной с вагоном, и $\vec{v}_0$ вагона относительно Земли.

Этот вывод справедлив для любых направлений векторов скорости $\vec{v}'$ и скорости $\vec{v}_0$. Закон, выражаемый формулой (1.2), называется *классическим законом сложения скоростей.*

2. РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

Движение любого тела в реальных условиях никогда не бывает строго равномерным и прямолинейным. Движение, при котором тело за равные промежутки времени совершает неодинаковые перемещения, называют *неравномерным движением.*

Ускорение. При неравномерном поступательном движении скорость тела изменяется с течением времени. Процесс изменения скорости тела характеризуется ускорением. *Ускорением* называется векторная величина, равная отношению очень малого изменения вектора скорости $\Delta\vec{v}$ к малому промежутку времени Δt, за которое произошло это изменение:

$$\vec{a}=\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}. \qquad (2.1)$$

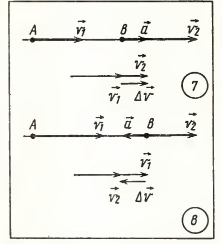
Если за промежуток времени Δt тело из точки A траектории переместилось в точку B и его скорость изменилась от $\vec{v}_1$ до $\vec{v}_2$, то изменение скорости $\Delta\vec{v}$ за этот промежуток времени равно разности векторов $\vec{v}_2$ и $\vec{v}_1$:

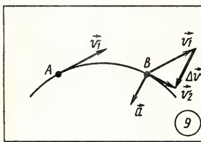
$$\Delta\vec{v}=\vec{v}_2-\vec{v}_1.$$

Направление вектора ускорения $\vec{a}$ совпадает с направлением вектора изменения скорости $\Delta\vec{v}$ при очень малых значениях промежутка времени Δt, за который происходит изменение скорости.

Если тело движется прямолинейно и скорость его возрастает по модулю, т. е. $v_2>v_1$, то направление вектора ускорения совпадает с направлением вектора скорости $\vec{v}_2$ (рис. 7); при убывании скорости по модулю, т. е. при $v_2<v_1$, направление вектора ускорения противоположно направлению вектора скорости $\vec{v}_2$ (рис. 8).

При движении тела по криволинейной траектории направление вектора скорости изменяется в процессе движения, вектор ускорения $\vec{a}$ при этом может оказаться направлен под любым углом к вектору скорости $\vec{v}_2$ (рис. 9).





Самый простой вид неравномерного движения — это равноускоренное движение. *Равноускоренным* называется движение с ускорением, постоянным по модулю и направлению:

$$\vec{a}=\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}=\text{const}. \qquad (2.2)$$

Из формулы (2.1) следует, что при выражении скорости в метрах в секунду, а времени в секундах ускорение выражается в *метрах на секунду в квадрате:*

$$\frac{1\ \text{м/с}}{1\ \text{с}}=1\text{м/с}^2.$$

Метр на секунду в квадрате равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с.

Скорость равноускоренного движения. При равноускоренном движении с начальной скоростью $\vec{v}_0$ ускорение $\vec{a}$ равно

$$\vec{a}=\frac{\vec{v}-\vec{v}_0}{t}, \qquad (2.3)$$

где $\vec{v}$ — скорость в момент времени t. Отсюда скорость равноускоренного движения равна

$$\vec{v}=\vec{v}_0+\vec{a}t. \qquad (2.4)$$

Проекции скорости и ускорения. Для выполнения расчетов скоростей и ускорений необходимо переходить от записи уравнений в векторной форме к записи уравнений в алгебраической форме.

Векторы начальной скорости $\vec{v}_0$ и ускорения $\vec{a}$ могут иметь различные направления, поэтому переход от уравнения (2.4) в векторной форме к уравнениям в алгебраической форме может оказаться довольно сложной задачей. Задача нахождения модуля и направления скорости равноускоренного движения в любой момент времени может быть успешно решена следующим путем. Как известно, проекция[1] суммы двух векторов на какую-либо координатную ось равна сумме проекций слагаемых векторов на ту же ось. Поэтому для нахожде-

[1] Проекцией вектора на координатную ось называется длина отрезка между проекциями начала и конца вектора на ось, взятая со знаком «+» или «−».

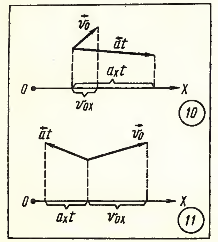
ния проекции v_x вектора скорости $\vec{v}$ на произвольную ось OX нужно найти алгебраическую сумму проекций векторов $\vec{v}_0$ и $\vec{a}t$ на ту же ось:

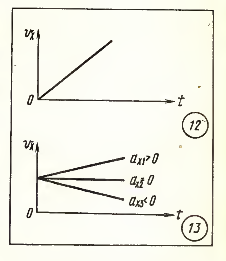
$$v_x = v_{0x} + a_x t. \qquad (2.5)$$

Проекцию вектора на ось считают положительной, если от проекции начала к проекции конца вектора нужно идти по направлению оси, и отрицательной — в противоположном случае.

Так, в случае расположения векторов $\vec{v}_0$ и $\vec{a}t$, представленном на рисунке 10, их проекции v_{0x} и $a_x t$ на ось OX положительны. В случае расположения векторов v_{0x} и $a_x t$, представленном на рисунке 11, проекция v_{0x} положительна, а проекция $a_x t$ отрицательна.

График скорости. Из уравнения (2.5) следует, что графиком зависимости проекции скорости равноускоренного движения от времени является прямая. Если проекция начальной скорости на ось OX равна нулю ($v_{0x} = 0$),





то эта прямая проходит через начало координат (рис. 12).

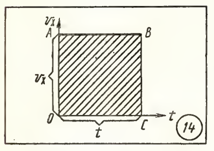
Графики зависимости проекции скорости v_x от времени t для равноускоренных движений, происходящих с одинаковой начальной скоростью $\vec{v}_0$ и различным ускорением $\vec{a}$, приведены на рисунке 13.

Перемещение тела при равномерном движении. Установим связь проекции s_x вектора перемещения на координатную ось OX при равномерном прямолинейном движении с проекцией v_x вектора скорости на ту же ось и временем t.

При равномерном прямолинейном движении график зависимости проекции скорости v_x от времени t является прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 14).

Проекция s_x перемещения тела за время t при равномерном движении со скоростью v (см. формулу 1.1) определяется выражением

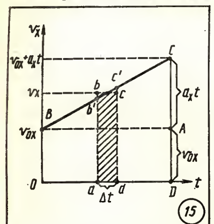
$$s_x = v_x t. \qquad (2.6)$$



Длина стороны OA прямоугольника $OABC$ (см. рис. 14) пропорциональна проекции скорости v_x, длина стороны OC — времени движения t. Следовательно, площадь прямоугольника $OABC$ прямо пропорциональна произведению v_xt или проекции перемещения s_x.

Перемещение тела при равноускоренном прямолинейном движении. График зависимости проекции v_x скорости тела от времени при равноускоренном прямолинейном движении представлен на рисунке 15.

Для вычисления проекции перемещения тела при равноускоренном прямолинейном движении за время t найдем сначала



перемещение за малый промежуток времени Δt.

Если промежуток времени Δt очень мал, то и изменение скорости за этот промежуток времени очень мало, т. е. движение в течение этого промежутка времени можно считать равномерным. При равномерном движении со скоростью, равной мгновенной скорости в момент времени, определяемый серединой промежутка времени Δt, проекция перемещения Δs_x за промежуток времени Δt равна $\Delta s_x = v_x\Delta t$ и пропорциональна площади прямоугольника $abcd$. Площадь прямоугольника $abcd$ равна площади трапеции $ab'c'd$.

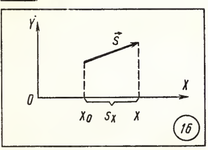
Разбив промежуток времени от 0 до t на малые промежутки времени Δt, мы получим, что проекция перемещения при равноускоренном прямолинейном движении за время t пропорциональна площади трапеции $OBCD$. Трапецию $OBCD$ можно представить состоящей из прямоугольника $OBAD$ и прямоугольного треугольника ABC. Сумма их площадей равна

$$S_{OBCD} = |AD| \cdot |OD| + \frac{1}{2}|AC| \times \times |BA|.$$

Отсюда для проекции перемещения при равноускоренном прямолинейном движении получается выражение

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_xt^2}{2}. \qquad (2.7)$$

Уравнение для координаты точки при равноускоренном движении. Для нахождения координаты x точки в любой момент времени t нужно к начальной координате x_0 точки прибавить проек-



цию вектора перемещения на ось OX (рис. 16):

$$x = x_0 + s_x. \qquad (2.8)$$

Из выражений (2.8) и (2.7) следует:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}. \qquad (2.9)$$

Связь проекции перемещения тела с конечной скоростью при равноускоренном движении. Из уравнений (2.5) и (2.7) можно получить уравнение, связывающее проекции конечной скорости v_x, начальной скорости v_{0x} и ускорения a_x с проекцией перемещения тела s_x:

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}. \qquad (2.10)$$

В случае равенства проекции начальной скорости нулю получаем выражение

$$s_x = \frac{v_x^2}{2a_x}. \qquad (2.11)$$

Из этого выражения можно найти проекции скорости v_x или ускорения a_x по известному значению проекции перемещения s_x:

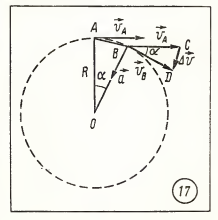
$$v_x = \sqrt{2a_x s_x}, \qquad (2.12)$$

$$a_x = \frac{v_x^2}{2s_x}. \qquad (2.13)$$

3. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

Среди различных видов криволинейного движения особый интерес представляет равномерное движение тела по окружности. Это самый простой вид криволинейного движения. Вместе с тем любое сложное криволинейное движение тела на достаточно малом участке его траектории можно приближенно рассматривать как равномерное движение по окружности.

Центростремительное ускорение. При равномерном движении по окружности значение скорости остается постоянным, а направление вектора скорости $\vec{v}$ изменяется в процессе движения. Определим ускорение тела, движущегося равномерно по окружности радиусом R. За интервал времени Δt тело проходит путь $\Delta s = v \cdot \Delta t$. Этот путь Δs равен длине дуги AB (рис. 17). Векторы скоростей $\vec{v}_A$ и $\vec{v}_B$ в точках A и B направлены по касательным к окружности в этих точках, угол α между векторами $\vec{v}_A$ и $\vec{v}_B$ равен углу между радиусами OA и OB.



Для нахождения вектора ускорения $\vec{a}$ нужно найти разность векторов скорости $\Delta\vec{v}=\vec{v}_B-\vec{v}_A$ и определить отношение изменения скорости к малому интервалу времени Δt, за который произошло это изменение:

$$\vec{a}=\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}.$$

Из подобия треугольников OAB и BCD следует

$$\frac{|OA|}{|AB|}=\frac{|BC|}{|CD|}. \qquad (3.1)$$

Если интервал времени Δt мал, то мал и угол α. При малых значениях угла α длина хорды AB примерно равна длине дуги AB, т. е. $|AB|\approx v\cdot\Delta t$. Так как $|OA|=R$, $|AB|\approx v\cdot\Delta t$ и $|CD|=\Delta v$, то из выражения (3.1) получаем

$$\frac{R}{v\cdot\Delta t}\approx\frac{v}{\Delta v}, \qquad (3.2)$$

$$\Delta v=\frac{v^2\cdot\Delta t}{R}. \qquad (3.3)$$

Поскольку

$$a=\frac{\Delta v}{\Delta t}, \qquad (3.4)$$

из выражений (3.3) и (3.4) получаем

$$a=\frac{v^2}{R}. \qquad (3.5)$$

Из рисунка 17 видно, что, чем меньше угол α, тем ближе направление вектора $\Delta\vec{v}$ к направлению на центр окружности. Так как вектор ускорения $\vec{a}$ равен отношению вектора $\Delta\vec{v}$ к интервалу времени Δt при условии, что интервал времени Δt очень мал, то вектор ускорения при равномерном движении по окружности направлен к ее центру.

При изменении положения тела на окружности меняется направление на центр окружности. Следовательно, при равномерном движении тела по окружности модуль ускорения имеет постоянное значение, но направление вектора ускорения изменяется со временем. Ускорение при равномерном движении по окружности называется центростремительным ускорением.

Период и частота. Промежуток времени, за который тело совершает полный оборот при движении по окружности, называется периодом. Период обращения тела по окружности обозначается буквой T. Так как длина окружности s равна $2\pi R$, период обращения при равномерном движении тела со скоростью v по окружности радиусом R равняется

$$T=\frac{2\pi R}{v}. \qquad (3.6)$$

Величина, обратная периоду обращения, называется частотой обращения. Частота обращения обозначается греческой буквой «ню» (ν) и показывает, сколько оборотов по окружности совершает тело в единицу времени:

$$\nu=\frac{1}{T} \text{ или } \nu=\frac{v}{2\pi R}. \qquad (3.7)$$

Единица частоты — $1/\text{с}$.

Используя формулы (3.5), (3.6) и (3.7), можно получить формулы для вычисления центростремительного ускорения:

$$a=\frac{4\pi^2R}{T^2} \qquad (3.8)$$

и

$$a=4\pi^2R\nu^2. \qquad (3.9)$$

4. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

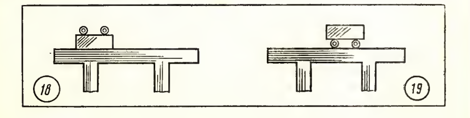
В кинематике мы рассматривали различные примеры механического движения тел, не выясняя законов взаимодействия тел. На практике для нахождения координат и скорости тела в любой момент времени обычно необходимо сначала определить неизвестное ускорение тела. Ускорения тел возникают при их взаимодействиях между собой.

Раздел механики, изучающий законы взаимодействия тел, называется динамикой.

Поставим на горизонтальную поверхность стола тележку. Тележка находится в состоянии покоя. Что нужно сделать, чтобы тележка двигалась? Из повседневного опыта каждому хорошо известно, что для движения тележки, любого предмета по горизонтальной поверхности нужно или тянуть тележку спереди, или толкать ее сзади. Для этой цели запрягли в телегу лошадь, затем изобрели тепловые двигатели, электрические машины и «запрягли» их в современные транспортные средства: автомобили, тепловозы, троллейбусы, трамваи.

Многим поколениям людей на основании их жизненного опыта казалось очевидным, что в природе действует закон, согласно которому тела движутся лишь тогда, когда на них действуют другие тела: без внешнего воздействия всякое движение само собой прекращается. Однако такие представления о механическом движении тел оказались совершенно ошибочными.

Выполним два опыта. В первом опыте положим тележку на стол вверх колесами и толчком приведем ее в движение. Опыт показывает, что через короткий промежуток времени движение тележки прекращается, тележка останавливается, пройдя очень короткий путь (рис. 18). Во втором опыте поставим тележку на колеса и таким же толчком приведем ее в движение. В этом опыте при такой же начальной скорости, как и в первом опыте, тележка движется гораздо дольше и проходит до остановки значительно больший путь (рис. 19). А можно ли добиться, чтобы тележка двигалась еще дольше и прошла еще больший путь? Опыты и практика показывают, что это возможно. Причиной уменьшения скорости тележки является взаимодействие ее с окружающими телами: поверхностью, по которой происходит движение, с атмосферным воздухом. Для уменьшения такого взаимодействия в колесах применяют подшипники, придают автомобилям обтекаемую форму. В результате современный автомо-



биль может после разгона многие десятки метров двигаться по горизонтальному участку шоссе с выключенным двигателем.

Если выключить двигатель моторной лодки, то движение лодки не прекратится. Лодка продолжает двигаться по воде прямолинейно.

Однако движение лодки постепенно замедляется. Причиной изменения скорости лодки является действие на нее воды.

Любое тело остается неподвижным, пока на него не действуют другие тела. Тело, двигавшееся с некоторой скоростью $\vec{v}$, продолжает двигаться равномерно и прямолинейно до тех пор, пока на него не подействуют другие тела.

К таким выводам о законах движения тел впервые пришел знаменитый итальянский ученый Галилео Галилей (1564—1642) и опубликовал их в 1632 г.

Явление сохранения скорости движения тела при отсутствии внешних воздействий называется *инерцией*.

Явление инерции хорошо знакомо каждому из собственного жизненного опыта. Например, при резком торможении автомобиля пассажир по инерции продолжает двигаться вперед с прежней скоростью.

Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона. Всякий покой и движение тел относительны. Одно и то же тело может находиться в состоянии покоя в одной системе отсчета и двигаться с ускорением в другой системе отсчета. В каких же системах отсчета наблюдается явление инерции и существуют ли такие системы отсчета? Ответ на этот вопрос дает один из основных законов механики, который называется *первым законом Ньютона* (или законом инерции). **Существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущиеся тела сохраняют свою скорость постоянной, если на них не действуют другие тела.**

Системы отсчета, относительно которых тело при отсутствии внешних воздействий движется прямолинейно и равномерно, называют *инерциальными системами отсчета*.

Системы отсчета, связанные с Землей, обычно считают инерциальными системами отсчета. Однако при повышении точности измерений на Земле обнаруживаются отклонения от закона инерции. Явления, противоречащие первому закону Ньютона, наблюдаются из-за того, что Земля вращается вокруг своей оси. К числу таких явлений относится, например, отклонение свободно падающих тел от вертикального направления к востоку.

5. МАССА ТЕЛА

Взаимодействие тел. Причиной изменения скорости движения тела всегда является его взаимодействие с другими телами.

После выключения двигателя автомобиль постепенно замедляет свое движение и останавливается. Основная причина изме-

нения скорости движения автомобиля — взаимодействие его колес с дорожным покрытием.

Неподвижно лежащий на земле мяч никогда сам собой не приходит в движение. Скорость мяча изменяется только в результате действия на него других тел, например ноги футболиста.

Постоянство отношения модулей ускорений. При взаимодействии двух тел всегда изменяются скорости и первого, и второго тела, т. е. оба тела приобретают ускорения. Модули ускорений двух взаимодействующих тел могут быть различными, но их отношение оказывается постоянным при любых взаимодействиях:

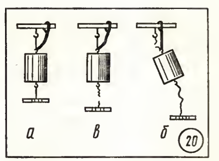
$$\frac{a_1}{a_2} = \text{const}. \qquad (5.1)$$

Инертность тел. Постоянство отношения модулей ускорений двух тел при любых их взаимодействиях показывает, что тела обладают каким-то свойством, от которого зависит их ускорение при взаимодействиях с другими телами. Ускорение тела равно отношению изменения его скорости к времени, за которое произошло это изменение:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Так как время действия тел друг на друга одинаково, изменение скорости больше у того тела, которое приобретает большее ускорение.

Чем меньше изменяется скорость тела при взаимодействии с другими телами, тем ближе его движение к равномерному прямолинейному движению по инерции. Такое тело называют более инертным.



Свойством инертности обладают все тела. Оно состоит в том, что для изменения скорости тела при взаимодействии его с любыми другими телами требуется некоторое время.

Проявление свойства инертности тел можно наблюдать в следующем опыте. На тонкой нити подвесим металлический цилиндр (рис. 20, *а*), снизу привяжем точно такую же нить. Опыт показывает, что при постепенном натяжении нижней нити обрывается верхняя нить (рис. 20, *б*). Если же резко дернуть за нижнюю нить, то верхняя нить остается целой, а обрывается нижняя нить (рис. 20, *в*). В этом случае сказывается инертность цилиндра, который не успевает за короткое время достаточно изменить свою скорость и совершить заметное перемещение, достаточное для разрыва верхней нити.

Масса тела. Свойство тела, от которого зависит его ускорение при взаимодействии с другими телами, называется *инертностью*. Количественной мерой инертности тела является масса тела. Чем большей массой обладает тело, тем меньшее ускорение оно получает при взаимодействии.

Поэтому в физике принято, что **отношение масс взаимодействующих тел равно обратному отношению модулей ускорений:**

$$\frac{m_1}{m_2}=\frac{a_2}{a_1}. \qquad (5.2)$$

За единицу массы в Международной системе принята масса специального эталона, изготовленного из сплава платины и иридия. Масса этого эталона называется *килограммом* (кг).

Массу $m_т$ любого тела можно найти, осуществив взаимодействие этого тела с эталоном массой $m_{эт}$.

По определению понятия массы отношение масс взаимодействующих тел равно обратному отношению модулей их ускорений (5.2). Измерив модули ускорений $a_т$ тела и $a_{эт}$ эталона, можно найти отношение массы тела $m_т$ к массе эталона $m_{эт}$:

$$\frac{m_т}{m_{эт}}=\frac{a_{эт}}{a_т}. \qquad (5.3)$$

Отношение массы тела $m_т$ к массе эталона $m_{эт}$ равно отношению модуля ускорения эталона $a_{эт}$ к модулю ускорения тела $a_т$ при их взаимодействии.

Масса тела может быть выражена через массу эталона:

$$m_т=m_{эт}\frac{a_{эт}}{a_т}. \qquad (5.4)$$

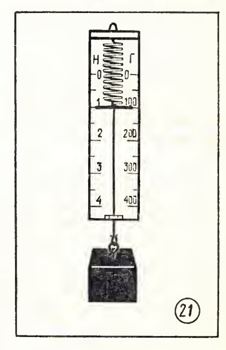
Масса тела — это физическая величина, характеризующая его инертность.

Измерение массы. Для измерения масс тел в науке, технике и повседневной практике редко применяется способ сравнения массы тела с массой эталона путем определения ускорений тел при их взаимодействии. Обычно используется способ сравнения масс тел с помощью весов.

При взвешивании для определения масс используется способность всех тел взаимодействовать с Землей. Опыты показали, что тела, обладающие одинаковой массой, одинаково притягиваются к Земле. Равенство притяжения тел к Земле можно, например, установить по равному растяжению пружины при поочередном подвешивании к ней тел с одинаковыми массами.

Используя набор эталонных тел с известными массами — гири, можно произвести градуировку пружинных весов и затем с их помощью измерить по растяжению пружины массы тел (рис. 21).

Опыт показывает, что если взять два тела с массами m_1 и m_2,



соединить их и измерить массу m_3 получившегося тела, то его масса m_3 оказывается равной сумме масс m_1 и m_2 этих тел:

$$m_3 = m_1 + m_2. \qquad (5.5)$$

Это позволяет определять массу тел уравновешиванием с помощью набора гирь иа равиоплечих весах.

Плотность вещества. Отношеиие массы m тела к его объему V иазывается плотностью вещества:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Плотность выражается в *килограммах на кубический метр*, единицей плотности является 1 кг/м^3.

6. СИЛА

Сила и ускорение. В инерциальных системах отсчета любое измеиение скорости тела происходит под действием других тел. Описывая действие одного тела иа другое, мы часто говорим о слабом, сильиом или очень сильном действии. Но значение слов «сильный удар», «слабый удар», иапример, при описании действия клюшки хоккеиста на шайбу совершеиио иеопределенио, пока иет количественной меры действия одного тела на другое. В физике для количествениого выражения действия одного тела иа другое вводится понятие «сила».

Когда нужно знать ускорение только одиого из двух взаимодействующих тел и можно ие рассматривать второе тело, то влияние одиого тела на другое, вызывающее возникиовеиие ускорения, иазывают силой, действующей на тело.

Если к концу пружииы прикрепить тележку и растянуть пружииу, то под действием пружины тележка движется ускореиио. Следовательно, со стороиы растянутой пружины на тележку действует сила. Эту силу иазывают силой упругости. Сила упругости зависит только от того, как растянута пружина, но не зависит от того, к какому телу она прикреплеиа.

Другой пример силы — сила тяжести, действующая на любое тело у поверхности Земли.

Взаимодействие тел может приводить к различиым изменениям их скоростей как по модулю, так и по направлению. Поэтому сила характеризуется не только числом, но и направлением.

Сила — величина векториая, ее обозиачают буквой $\vec{F}$.

За направление вектора силы принимается направление вектора ускореиия тела, на которое действует сила.

В Международной системе единиц за единицу силы принимается сила, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение 1 м/с^2. Эта единица называется иьютоном (Н):

$$1\ \text{Н} = 1\,\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}^2}.$$

7. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Второй закон Ньютона. Связь между силой и ускорением тела устанавливается на основании опыта. Подействуем с помощью растянутой пружины сначала на одну тележку и вычислим по пути s_1, пройденному за время t (рис. 22), модуль a ускорения ее движения.

Затем ту же самую пружину прикрепим к двум тележкам, т. е. используем тело с массой в два раза большей, чем в первом опыте (рис. 23).

Второй опыт показывает, что под действием той же силы тележки за то же время t проходят в два раза меньший путь s_2 (рис. 23), чем в первом опыте, т. е. движутся с вдвое меньшим ускорением. А это означает, что **при действии одной и той же силы на разные тела оказывается одинаковым произведение массы тела на его ускорение.** На основании опытов, подобных описанному выше, Ньютон сформулировал один из основных законов механики: **сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение:**

$$\vec{F} = m\vec{a}. \qquad (6.1)$$

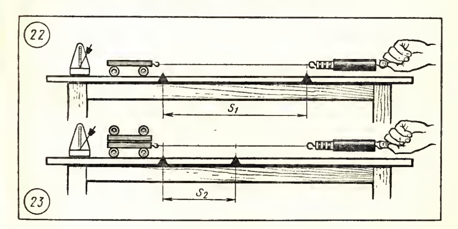
Этот закон называется *вторым законом Ньютона.*

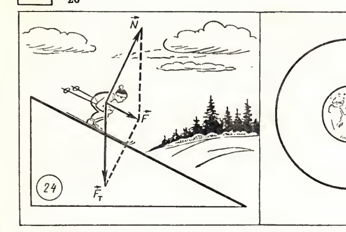
Из второго закона Ньютона следует, что для определения ускорения тела нужно знать действующую на тело силу и массу тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \qquad (6.2)$$

Выражение (6.1) нельзя рассматривать формально и делать вывод, будто сила зависит от массы и ускорения тела или масса тела зависит от его ускорения и действующей силы. Смысл второго закона Ньютона заключается в том, что действующие на тело силы определяют изменение скорости тела, а не скорость движения тела.

Второй закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчета.





Сложение сил. При одновременном действии на одно тело нескольких тел тело движется с ускорением, являющимся векторной суммой ускорений, которые возникли бы под действием каждого тела в отдельности. Действующие на тело силы, приложенные к одной точке тела, складываются по правилу сложения векторов. Векторная сумма всех одновременно действующих на тело сил называется *равнодействующей;* сила $\vec{F}$ (рис. 24) — равнодействующая силы тяжести $\vec{F}_т$ и реакции опоры $\vec{N}$.

8. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

При любом взаимодействии двух тел массами m_1 и m_2 отношение модулей приобретаемых телами ускорений остается постоянным и равным обратному отношению масс тел:

$$\frac{a_1}{a_2}=\frac{m_2}{m_1}.$$

Отсюда для произведений масс тел на модули их ускорений следует равенство

$$m_1a_1=m_2a_2. \qquad (8.1)$$

При взаимодействии тел векторы их ускорений всегда имеют противоположные направления. С учетом этого уравнение (8.1) примет такой вид:

$$m_1\vec{a}_1=-m_2\vec{a}_2. \qquad (8.2)$$

По второму закону Ньютона сила $\vec{F}_1$, действующая на первое тело, равна $\vec{F}_1=m_1\vec{a}_1$, а сила $\vec{F}_2$, действующая на второе тело, равна $\vec{F}_2=m_2\vec{a}_2$.

Отсюда получаем равенство

$$\vec{F}_1=-\vec{F}_2, \qquad (8.3)$$

называемое *третьим законом Ньютона.*

Тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной прямой, равными по модулю и противоположными по направлению.

Силы, возникающие при взаимодействии двух тел, всегда имеют одну природу. Если, например, Земля притягивает Луну силой тяготения, то равная по модулю

и противоположно направленная сила, действующая со стороны Луны на Землю, также является силой тяготения (рис. 25).

Применяя третий закон Ньютона, всегда следует помнить, что равные по модулю и противоположно направленные силы действия и противодействия приложены к разным телам и поэтому не могут уравновешивать друг друга.

Третий закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчета.

9. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Свободное падение тел. Падение тел на Землю в пустоте называется *свободным падением тел.* При падении в стеклянной трубке, из которой с помощью насоса откачан воздух, кусок свинца, пробка и легкое перо достигают дна одновременно (рис. 26). Следовательно, при свободном падении все тела независимо от их массы движутся одинаково.

Свободное падение является равноускоренным движением.

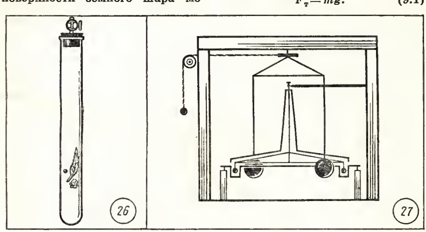
Ускорение, с которым падают на Землю тела в пустоте, называется *ускорением свободного падения.* Ускорение свободного падения обозначается буквой $\vec{g}$. У поверхности земного шара модуль ускорения свободного падения примерно равен

$$\vec{g} \approx 9{,}8 \text{ м/с}^2.$$

Если в расчетах не требуется высокая точность, то принимают, что модуль ускорения свободного падения у поверхности Земли равен 10 м/с^2.

Одинаковое значение ускорения свободно падающих тел, имеющих разную массу, свидетельствует о том, что сила, под действием которой тело приобретает ускорение свободного падения, пропорциональна массе тела. Эта сила притяжения, действующая со стороны Земли на все тела, называется силой тяжести:

$$\vec{F}_т = m\vec{g}. \qquad (9.1)$$



Сила тяжести действует на любое тело у поверхности Земли и на расстоянии 1 м от поверхности, и на расстоянии 10 км, где летают самолеты. А действует ли сила тяжести на еще больших расстояниях от Земли? Зависят ли сила тяжести и ускорение свободного падения от расстояния до Земли? Над этими вопросами думали многие ученые, но впервые ответы на них дал в XVII в. великий английский физик Исаак Ньютон (1643—1727).

Зависимость силы тяжести от расстояния. Ньютон предположил, что сила тяжести действует на любом расстоянии от Земли, но ее значение убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра Земли. Проверкой этого предположения могло быть измерение силы притяжения какого-то тела, находящегося на большом расстоянии от Земли, и сравнение ее с силой притяжения того же тела у поверхности Земли.

Для определения ускорения движения тела под действием силы тяжести на большом расстоянии от Земли Ньютон воспользовался результатами астрономических наблюдений за движением Луны.

Он предположил, что сила притяжения, действующая со стороны Земли на Луну, есть та же самая сила тяжести, которая действует на любые тела у поверхности Земли. Следовательно, центростремительное ускорение при движении Луны по орбите вокруг Земли представляет собой ускорение свободного падения Луны на Землю.

Расстояние от центра Земли до центра Луны равно 384 000 км. Это примерно в 60 раз больше расстояния от центра Земли до ее поверхности.

Если сила тяжести убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра Земли, то ускорение свободного падения на орбите Луны должно быть в $(60)^2$ раза меньше ускорения свободного падения у поверхности Земли g:

$$g_{л} = \frac{g}{(60)^2},$$

$$g_{л} = \frac{9{,}8\ м/с^2}{3600} \approx 2{,}7 \cdot 10^{-3} м/с^2.$$

По известным значениям радиуса орбиты Луны и периода ее обращения вокруг Земли Ньютон вычислил центростремительное ускорение Луны. Оно оказалось действительно равным $2{,}7 \cdot 10^{-3}$ м/с^2.

Теоретически предсказанное значение ускорения свободного падения совпало со значением, полученным в результате астрономических наблюдений. Это доказывало справедливость предположения Ньютона о том, что сила тяжести убывает обратно пропорционально квадрату расстояния R от центра Земли:

$$F_т \sim \frac{1}{R^2}. \qquad (9.2)$$

Закон всемирного тяготения. Подобно тому как Луна движется вокруг Земли, Земля в свою очередь обращается вокруг Солнца. Вокруг Солнца обращаются Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и другие планеты Солнеч-

ной системы. Ньютон доказал, что движение планет вокруг Солнца происходит под действием силы притяжения, направленной к Солнцу и убывающей обратно пропорционально квадрату расстояния от него. Земля притягивает Луну, а Солнце — Землю, Солнце притягивает Юпитер, а Юпитер — свои спутники и т. д. Отсюда Ньютон сделал вывод, что все тела во Вселенной взаимно притягивают друг друга.

Силу взаимного притяжения, действующую между Солнцем, планетами, кометами, звездами и другими телами во Вселенной, Ньютон назвал *силой всемирного тяготения.*

Сила всемирного тяготения, действующая на Луну со стороны Земли, пропорциональна массе Луны (см. формулу 9.1). Очевидно, что сила всемирного тяготения, действующая со стороны Луны на Землю, пропорциональна массе Земли. Эти силы по третьему закону Ньютона равны между собой. Следовательно, сила всемирного тяготения, действующая между Луной и Землей, пропорциональна массе Земли и массе Луны, т. е. пропорциональна произведению их масс.

Распространив установленные закономерности — зависимость силы тяжести от расстояния и от масс взаимодействующих тел — на взаимодействие всех тел во Вселенной, Ньютон открыл в 1682 г. *закон всемирного тяготения:* **все тела притягиваются друг к другу, сила всемирного тяготения прямо пропорциональна произведению масс тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:**

$$F_т = G\frac{m_1 m_2}{R^2}. \qquad (9.3)$$

Векторы сил всемирного тяготения направлены вдоль прямой, соединяющей тела.

Закон всемирного тяготения в такой форме может быть использован для вычисления сил взаимодействия между телами любой формы, если размеры тел значительно меньше расстояния между ними. Ньютон доказал, что для однородных шарообразных тел закон всемирного тяготения в данной форме применим при любых расстояниях между телами. За расстояние R между телами в этом случае принимается расстояние между центрами шаров.

Силы всемирного тяготения называют *гравитационными силами,* а коэффициент пропорциональности G в законе всемирного тяготения называют *гравитационной постоянной.*

Гравитационная постоянная. Если существует сила притяжения между земным шаром и куском мела, то, вероятно, существует сила притяжения и между половиной земного шара и куском мела. Продолжая мысленно такой процесс деления земного шара, мы придем к выводу, что гравитационные силы должны действовать между любыми телами, начиная от звезд и планет и кончая молекулами, атомами и элементарными частицами. Это предположение было доказано экспериментально английским физиком Генри Кавендишем (1731—1810) в 1788 г.

Кавендиш выполнил опыты по обнаружению гравитационного взаимодействия тел небольших

размеров с помощью крутильных весов. Два одинаковых небольших свинцовых шара диаметром примерно 5 см были укреплены на стержне длиной около 2 м, подвешенном на тонкой медной проволоке. Против малых шаров он устанавливал большие свинцовые шары диаметром 20 см каждый (рис. 27). Опыты показали, что при этом стержень с малыми шарами поворачивался, что говорит о наличии силы притяжения между свинцовыми шарами.

Повороту стержня препятствует сила упругости, возникающая при закручивании подвеса. Эта сила пропорциональна углу поворота. Силу гравитационного взаимодействия шаров можно определить по углу поворота подвеса.

Массы шаров m_1 и m_2, расстояние R между ними в опыте Кавендиша были известны, сила гравитационного взаимодействия $F_т$ измерялась непосредственно; поэтому опыт позволил определить гравитационную постоянную G в законе всемирного тяготения. По современным данным она равна

$$G = 6{,}6720 \cdot 10^{-11} \text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}.$$

10. ВЕС И НЕВЕСОМОСТЬ

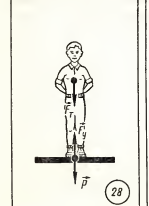
Вес тела. В технике и быту широко используется понятие веса тела.

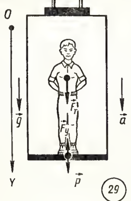
Весом тела называют силу, с которой тело вследствие его притяжения к Земле действует на горизонтальную опору или подвес.

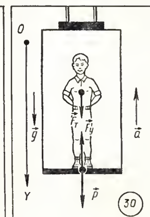
Вес тела $\vec{P}$, т. е. сила, с которой тело действует на опору, и сила упругости $\vec{F}_у$, с которой опора действует на тело (рис. 28), в соответствии с третьим законом Ньютона равны по модулю и противоположны по направлению:

$$\vec{P} = -\vec{F}_у. \qquad (10.1)$$

Если тело находится в покое на горизонтальной поверхности или равномерно движется и на него действуют только сила тяжести $\vec{F}_т$ и сила упругости $\vec{F}_у$ со стороны опоры, то из равенства нулю







векторной суммы этих сил следует равенство

$$\vec{F}_т = -\vec{F}_у. \qquad (10.2)$$

Сопоставив выражения (10.1) и (10.2), получим

$$\vec{P} = \vec{F}_т, \qquad (10.3)$$

т. е. вес $\vec{P}$ тела на неподвижной или равномерно движущейся горизонтальной опоре равен силе тяжести $\vec{F}_т$, но приложены эти силы к разным телам.

При ускоренном движении тела и опоры вес $\vec{P}$ будет отличаться от силы тяжести $\vec{F}_т$.

По второму закону Ньютона при движении тела массой m под действием силы тяжести $\vec{F}_т$ и силы упругости $\vec{F}_у$ с ускорением $\vec{a}$ выполняется равенство

$$\vec{F}_т + \vec{F}_у = m\vec{a}. \qquad (10.4)$$

Из уравнений (10.1) и (10.4) для веса $\vec{P}$ получаем

$$\vec{P} = \vec{F}_т - m\vec{a} = m\vec{g} - m\vec{a}, \qquad (10.5)$$

или

$$\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a}). \qquad (10.6)$$

Рассмотрим случай движения лифта, когда ускорение $\vec{a}$ направлено вертикально вниз. Если координатную ось OY направить вертикально вниз, то векторы $\vec{P}$, $\vec{g}$ и $\vec{a}$ оказываются параллельными оси OY (рис. 29), а их проекции положительными; тогда уравнение (10.6) примет вид

$$P_y = m(g_y - a_y).$$

Так как проекции положительны и параллельны координатной оси, их можно заменить модулями векторов:

$$P = m(g - a). \qquad (10.7)$$

Вес тела, направление ускорения которого совпадает с направлением ускорения свободного падения, меньше веса покоящегося тела.

Невесомость. Если тело вместе с опорой свободно падает, то $a = g$, и из формулы (10.7) следует, что $P = 0$.

Исчезновение веса при движении опоры с ускорением свободного падения называется *невесомостью*.

Состояние невесомости наблюдается в самолете или космическом корабле при движении с ускорением свободного падения независимо от направления и значения модуля скорости их движения. За пределами земной атмосферы при выключении реактивных двигателей на космический корабль действует только сила всемирного тяготения. Под действием этой силы космический корабль и все тела, находящиеся в нем, движутся с одинаковым ускорением; поэтому в корабле наблюдается явление невесомости.

Перегрузка. При ускоренном движении тела и опоры с ускорением, направленным вертикально вверх (рис. 30), вес тела оказывается больше действующей на него силы тяжести.

В этом случае проекции P_y и g_y положительны, а проекция a_y отрицательна. Поэтому для модуля веса тела получаем выражение

$$P = m(g + a). \qquad (10.8)$$

Увеличение веса тела, вызванное ускоренным движением опоры или подвеса, называют *перегрузкой*. Действие перегрузки ис-

пытывают на себе космонавты как при взлете космической ракеты, так и на участке торможения космического корабля при входе в плотные слои атмосферы. Испытывают перегрузки и летчики при выполнении фигур высшего пилотажа, и водители автомобилей при движении с большими ускорениями.

11. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Рассмотрим вопрос о движении тел под действием силы тяжести. Если модуль перемещения тела много меньше расстояния до центра Земли, то можно считать силу всемирного тяготения во время движения постоянной, а движение тела равноускоренным. Самый простой случай движения тел под действием силы тяжести — свободное падение с начальной скоростью, равной нулю. В этом случае тело движется прямолинейно с ускорением свободного падения по направлению к центру Земли. Если начальная скорость тела отлична от нуля и вектор начальной скорости направлен не по вертикали, то тело под действием силы тяжести движется с ускорением свободного падения по криволинейной траектории. Форму такой траектории наглядно иллюстрирует струя воды, вытекающая под некоторым углом к горизонту (рис. 31).

При бросании тела с некоторой высоты параллельно земной поверхности дальность полета будет тем большей, чем больше начальная скорость.

31

При больших значениях начальной скорости необходимо учитывать шарообразность Земли и изменение направления вектора силы тяжести в разных точках траектории.

Первая космическая скорость. При некотором значении начальной скорости тело, брошенное по касательной к поверхности Земли, под действием силы тяжести при отсутствии атмосферы может двигаться вокруг Земли по окружности, не падая на Землю и не удаляясь от нее.

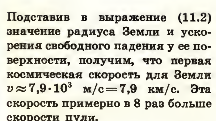
Скорость, с которой происходит движение тела по круговой орбите под действием силы всемирного тяготения, называется *первой космической скоростью.*

Определим первую космическую скорость для Земли (см. передний форзац). Если тело под действием силы тяжести движется вокруг Земли равномерно по окружности радиусом R, то ускорение свободного падения является его центростремительным ускорением:

$$\frac{v^2}{R} = g. \qquad (11.1)$$

Отсюда первая космическая скорость равна

$$v = \sqrt{Rg}. \qquad (11.2)$$



Подставив в выражение (11.2) значение радиуса Земли и ускорения свободного падения у ее поверхности, получим, что первая космическая скорость для Земли $v \approx 7{,}9 \cdot 10^3$ м/с $= 7{,}9$ км/с. Эта скорость примерно в 8 раз больше скорости пули.

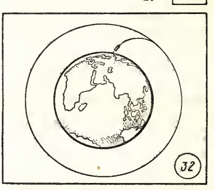
Первая космическая скорость для любого небесного тела также определяется выражением (11.2). Ускорение свободного падения на расстоянии R от центра небесного тела можно найти, воспользовавшись вторым законом Ньютона и законом всемирного тяготения:

$$a = \frac{F}{m} = G\frac{M}{R^2}. \qquad (11.3)$$

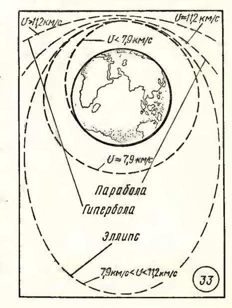
Из выражений (11.2) и (11.3) получаем, что первая космическая скорость на расстоянии R от центра небесного тела массой M равна

$$v = \sqrt{G\frac{M}{R}}. \qquad (11.4)$$

Для запуска на околоземную орбиту искусственный спутник Земли или космический корабль необходимо сначала вывести за пределы атмосферы. Поэтому космические корабли стартуют вертикально. На высоте 200—300 км от поверхности Земли атмосфера очень разрежена и почти не влияет на движение космических кораблей. На такой высоте ракета делает поворот и сообщает аппарату, запускаемому на орбиту искусственного спутника, первую космическую скорость в направлении, перпендикулярном вертикали (рис. 32).



Если космическому аппарату сообщается скорость меньше первой космической, то он движется по траектории, которая пересекается с поверхностью земного шара, т. е. аппарат падает на Землю. При начальной скорости больше 7,9 км/с, но меньше 11,2 км/с космический аппарат движется вокруг Земли по криволинейной траектории — эллипсу. Чем больше начальная скорость, тем все более вытянут эллипс.



При достижении некоторого значения скорости, называемого *второй космической скоростью*, эллипс превращается в параболу и космический корабль уходит от Земли безвозвратно. У поверхности Земли вторая космическая скорость равна 11,2 км/с. При скорости более второй космической тело движется по гиперболической траектории (рис. 33).

12. СИЛА УПРУГОСТИ

Вблизи поверхности Земли на любое тело действует сила тяжести, однако большинство тел вокруг нас не падают с ускорением, а находятся в покое. Неподвижны книга, лежащая на столе, и стол, стоящий на полу.

Книга на столе неподвижна,— значит, кроме силы тяжести, на нее действуют другие силы и равнодействующая всех сил равна нулю.

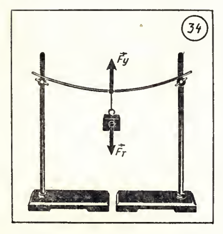
Какие же это силы и как они возникают?

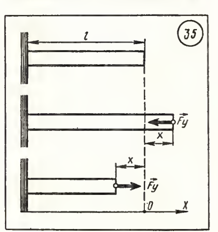
Выполним следующий опыт. Положим стальную линейку на лапки штативов таким образом, чтобы линейка была расположена горизонтально. Против середины стальной линейки установим демонстрационную линейку и заметим по ее шкале начальное положение середины стальной линейки.

Затем подвесим к середине стальной линейки небольшую гирю. Мы увидим, что стальная линейка изогнется. Неподвижность гири показывает, что сила тяжести, действующая на нее со стороны Земли, уравновешена равной по модулю и противоположно направленной силой, возникающей при деформации линейки (рис. 34).

Сила, возникающая в результате деформации тела и направленная в сторону, противоположную перемещениям частиц тела при деформации, называется *силой упругости*.

Опыты по растяжению и сжатию твердых стержней показали, что при малых по сравнению с размерами тел деформациях мо-





дуль силы упругости прямо пропорционален модулю вектора перемещения свободного конца стержня. Направление вектора силы упругости противоположно направлению вектора перемещения при деформации (рис. 35). Поэтому для проекции силы упругости на ось OX, направленную по вектору перемещения, выполняется равенство

$$(F_y)_x = -kx, \qquad (12.1)$$

где x — удлинение стержня.

Связь между проекцией силы упругости и удлинением тела была установлена экспериментально английским ученым Робертом Гуком (1635—1703) и поэтому называется *законом Гука*.

Сила упругости, возникающая при деформации тела, пропорциональна удлинению тела и направлена в сторону, противоположную направлению перемещений частиц тела при деформации.

Коэффициент пропорциональности k в законе Гука называется *жесткостью тела*. Жесткость тела зависит от формы и размеров тела и от материала, из которого оно изготовлено. Жесткость в СИ выражается в *ньютонах на метр* (Н/м).

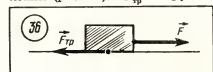
Выясним природу сил упругости. В состав атомов и молекул входят частицы, обладающие электрическими зарядами. Атомы в твердом теле расположены таким образом, что силы отталкивания одноименных электрических зарядов и притяжения разноименных зарядов уравновешивают друг друга. При изменениях взаимных положений атомов или молекул в твердом теле в результате его деформации электрические силы стремятся возвратить атомы в первоначальное положение. Так при деформации возникает сила упругости.

Силы взаимодействия электрических зарядов называются электромагнитными силами. Так как силы упругости обусловлены взаимодействиями зарядов, по своей природе они являются *электромагнитными силами.*

13. СИЛЫ ТРЕНИЯ

Силы трения покоя. Прикрепим к бруску крючок динамометра и попытаемся привести брусок в движение. Растяжение пружины динамометра показывает, что на брусок действует сила упругости, но тем не менее брусок остается неподвижным. Это значит, что при действии на брусок силы упругости в направлении, параллельном поверхности соприкосновения бруска со столом, возникает равная ей по модулю сила противоположного направления. Сила, возникающая на границе соприкосновения тел при отсутствии относительного движения тел, называется *силой трения покоя.*

Сила трения покоя $\vec{F}_{тр}$ равна по модулю внешней силе $\vec{F}$, направленной по касательной к поверхности соприкосновения тел, и противоположна ей по направлению (рис. 36): $\vec{F}_{тр} = -\vec{F}$.

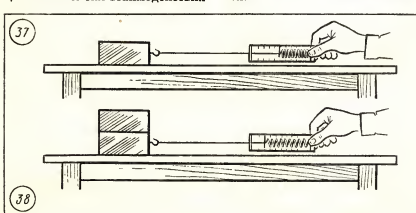


Сила трения скольжения. Прикрепим динамометр к бруску и заставим брусок двигаться равномерно по горизонтальной поверхности стола. Во время равномерного движения бруска динамометр показывает, что на брусок со стороны пружины действует постоянная сила упругости $\vec{F}_у$. При равномерном движении бруска равнодействующая всех сил, приложенных к нему, равна нулю. Следовательно, кроме силы упругости, во время равномерного движения на брусок действует сила, равная по модулю силе упругости, но направленная в противоположную сторону. Эта сила называется *силой трения скольжения* $\vec{F}_{тр}$.

Вектор силы трения скольжения $\vec{F}_{тр}$ всегда направлен противоположно вектору скорости $\vec{v}$ движения тела относительно соприкасающегося с ним тела. Поэтому действие силы трения скольжения всегда приводит к уменьшению модуля относительной скорости тел.

Природа силы трения. Силы трения возникают благодаря существованию сил взаимодействия между молекулами и атомами соприкасающихся тел. Последние обусловлены взаимодействием электрических зарядов, которыми обладают частицы, входящие в состав атомов.

Коэффициент трения. Исследуем, от чего зависит сила трения. Для этого воспользуемся гладкой деревянной доской, деревянным бруском и динамометром (рис. 37). Сначала проверим, зависит ли сила трения от площади поверхности соприкосновения тел. Положим брусок на горизонтально расположенную доску гранью с самой большой площадью поверхности. Прикрепив к бруску динамометр, будем плавно увеличивать силу, направленную вдоль поверхности доски, и заметим максимальное значение силы трения покоя. Затем поставим тот же брусок на другую грань с меньшей площадью поверхности и вновь измерим максимальное значение силы трения покоя. Опыт показывает, что максимальное значение силы трения покоя не зависит от площади поверхности соприкосновения тел.



Повторив такие же измерения при равномерном движении бруска по поверхности доски, убеждаемся, что сила трения скольжения также не зависит от площади поверхности соприкосновения тел.

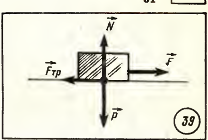
Поставим на первый брусок второй такой же. Этим мы увеличим силу, перпендикулярную поверхности соприкосновения тела и стола (ее называют силой давления $\vec{P}$). Если теперь мы вновь измерим максимальную силу трения покоя (рис. 38), то увидим, что она увеличилась в два раза. Поставив на два бруска третий, обнаруживаем, что максимальная сила трения покоя увеличилась в три раза.

На основании таких опытов можно сделать вывод, что *максимальное значение модуля силы трения покоя прямо пропорционально силе давления.*

Взаимодействие тела и опоры вызывает деформацию и тела, и опоры.

Силу упругости $\vec{N}$, возникающую в результате деформации опоры и действующую на тело, называют силой реакции опоры (рис. 39). По третьему закону Ньютона сила давления и сила реакции опоры равны по модулю и противоположны по направлению:

$$\vec{P} = -\vec{N}.$$



Поэтому предыдущий вывод можно сформулировать так: модуль максимальной силы трения покоя пропорционален силе реакции опоры:

$$F_{тр.\ max} = \mu N.$$

Греческой буквой μ обозначен коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом трения.*

Опыт показывает, что модуль силы трения скольжения $F_{тр}$, как и модуль максимальной силы трения покоя, пропорционален модулю силы реакции опоры:

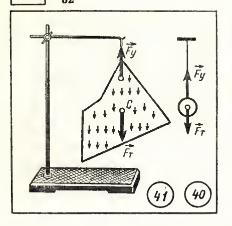
$$F_{тр} = \mu N.$$

Максимальное значение силы трения покоя примерно равно силе трения скольжения, приближенно равны также коэффициенты трения покоя и скольжения.

Силы трения возникают и при качении тела. При одинаковой нагрузке сила трения качения значительно меньше силы трения скольжения. Поэтому для уменьшения сил трения в технике применяются колеса, шариковые и роликовые подшипники.

14. УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛ

Статика. Основным признаком взаимодействия тел в динамике является возникновение ускорений. Однако часто бывает нужно знать, при каких условиях тело, на которое действует несколько различных сил, не движется с ускорением. Подвесим



шар на нити. На шар действует сила тяжести, но не вызывает ускоренного движения к Земле. Этому препятствует действие равной по модулю и направленной в противоположную сторону силы упругости. Сила тяжести и сила упругости уравновешивают друг друга, их равнодействующая равна нулю, поэтому равно нулю и ускорение шара (рис. 40).

Точку, через которую проходит равнодействующая сил тяжести при любом расположении тела, называют центром тяжести (рис. 41).

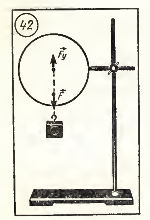
Раздел механики, изучающий условия равновесия сил, называется *статикой*.

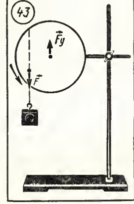
Равновесие невращающихся тел. Равномерное прямолинейное поступательное движение тела или его покой возможны только при равенстве нулю геометрической суммы всех сил, приложенных к телу.

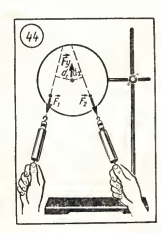
Невращающееся тело находится в равновесии, если геометрическая сумма сил, приложенных к телу, равна нулю.

Равновесие тел, имеющих ось вращения. В повседневной жизни и технике часто встречаются тела, которые не могут двигаться поступательно, но могут вращаться вокруг оси. Примерами таких тел могут служить двери и окна, колеса автомобиля, качели и т. д. Если вектор силы $\vec{F}$ лежит на прямой, пересекающей ось вращения, то эта сила уравновешивается силой упругости $\vec{F}_y$ со стороны оси вращения (рис. 42).

Если же прямая, на которой лежит вектор силы $\vec{F}$, не пересекает ось вращения, то эта сила не может быть уравновешена си-







лой упругости со стороны оси вращения, и тело поворачивается вокруг оси (рис. 43).

Вращение тела вокруг оси под действием одной силы $\vec{F}_1$ может быть остановлено действием второй силы $\vec{F}_2$. Опыт показывает, что если две силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ по отдельности вызывают вращение тела в противоположных направлениях, то при их одновременном действии тело находится в равновесии, если выполняется условие:

$$F_1d_1=F_2d_2,$$

где d_1 и d_2 — кратчайшие расстояния от прямых, на которых лежат векторы сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ (линии действия сил), до оси вращения (рис. 44). Расстояние d называется *плечом силы*, а произведение модуля силы F на плечо d называется ***моментом силы*** M:

$$M=Fd. \qquad (14.1)$$

Если моментам сил, вызывающим вращение тела вокруг оси по часовой стрелке, приписать положительный знак, а моментам сил, вызывающим вращение против часовой стрелки,— отрицательный знак, то условие равновесия тела, имеющего ось вращения, можно сформулировать в виде *правила моментов: тело, имеющее неподвижную ось вращения, находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов всех приложенных к телу сил относительно этой оси равна нулю:*

$$M_1+M_2+M_3+...+M_n=0 \qquad (14.2)$$

За единицу вращающего момента в СИ принимается момент силы в 1 Н, линия действия которой находится на расстоянии 1 м от оси вращения. Эту единицу называют ***ньютон-метром*** (Н·м).

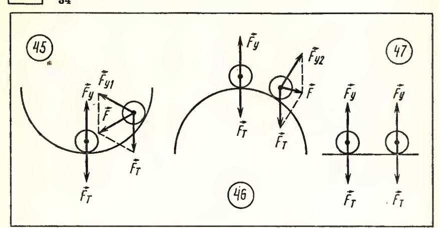
Общее условие равновесия тела. Объединяя два вывода, можно сформулировать общее условие равновесия тела: **тело находится в равновесии, если равны нулю геометрическая сумма векторов всех приложенных к нему сил и алгебраическая сумма моментов этих сил относительно оси вращения.**

При выполнении общего условия равновесия тело необязательно находится в покое. Согласно второму закону Ньютона при равенстве нулю равнодействующей всех сил ускорение тела равно нулю и оно может находиться в покое или двигаться равномерно и прямолинейно.

Равенство нулю алгебраической суммы моментов сил не означает также, что при этом тело обязательно находится в покое. На протяжении нескольких миллиардов лет с постоянным периодом продолжается вращение Земли вокруг оси именно потому, что алгебраическая сумма моментов сил, действующих на Землю со стороны других тел, очень мала. По той же причине продолжает вращение с постоянной частотой раскрученное велосипедное колесо, и только внешние силы останавливают это вращение.

Виды равновесия. В практике большую роль играет не только выполнение условия равновесия тел, но и качественная характеристика равновесия, называемая *устойчивостью*. Различают три вида равновесия тел: устойчивое, неустойчивое и безразличное. Рав-

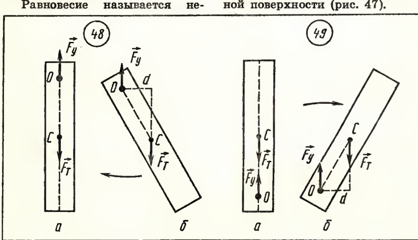
2 Заказ 937

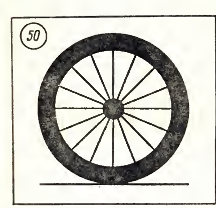


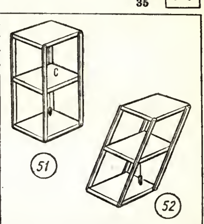
новесие называется устойчивым, если после небольших внешних воздействий тело возвращается в исходное состояние равновесия. Это происходит, если при небольшом смещении тела в любом направлении от первоначального положения равнодействующая сил, действующих на тело, становится отличной от нуля и направлена к положению равновесия. В устойчивом равновесии находится, например, шар на дне углубления (рис. 45).

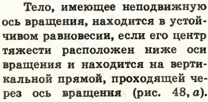
Равновесие называется неустойчивым, если при небольшом смещении тела из положения равновесия равнодействующая приложенных к нему сил отлична от нуля и направлена от положения равновесия (рис. 46).

Если при небольших смещениях тела из первоначального положения равнодействующая приложенных к телу сил остается равной нулю, то тело находится в состоянии безразличного равновесия. В безразличном равновесии находится шар на горизонтальной поверхности (рис. 47).









Тело, имеющее неподвижную ось вращения, находится в устойчивом равновесии, если его центр тяжести расположен ниже оси вращения и находится на вертикальной прямой, проходящей через ось вращения (рис. 48, *а*).

При небольшом отклонении от этого положения равновесия алгебраическая сумма моментов сил, действующих на тело, становится отличной от нуля и возникающий момент сил поворачивает тело к первоначальному положению равновесия (рис. 48, *б*).

Если же центр тяжести находится на вертикальной прямой, проходящей через ось вращеиня, но расположен выше оси вращения, то равиовесие неустойчивое (рис. 49, *а*, *б*).

Тело находится в безразличном равновесии, когда ось вращения тела проходит через его центр тяжести (рис. 50).

Равновесие тела на опоре. Если вертикальная линия, проведенная через центр тяжести C тела, пересекает площадь опоры, то тело находится в равновесни (рис. 51). Если же вертикальная линия, проведенная через центр тяжести, не пересекает площадь опоры, то тело опрокидывается (рис. 52).

15. ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОСТАТИКИ

Давление. При рассмотрении взаимодействий тел не всегда достаточно знать только действующие силы. Во многих случаях важно знать, на поверхность какой площади тела действует сила. Один и тот же человек по снегу идет, глубоко проваливаясь, а надев лыжи, идет, почти ие проваливаясь в снег.

Физическую величину, равную отношению модуля силы $\vec{F}$, действующей перпендикулярно поверхности, к площади S этой поверхности, называют давлением:

$$p = \frac{F}{S}. \qquad (15.1)$$

За единицу давления в СИ принято давление, которое производит сила 1 Н на перпендикулярную к ней поверхность площадью 1 м². Эта единица называется *паскалем* (Па):

$$1\ \text{Па} = \frac{1\ \text{Н}}{1\ \text{м}^2} = 1\ \text{Н/м}^2.$$

Наименование единице давления дано в честь французского ученого Блеза Паскаля (1623—1662).

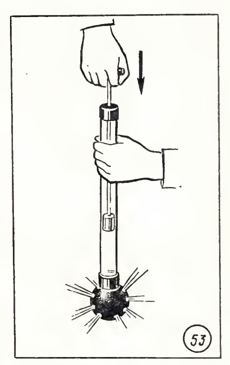
На практике применяются внесистемные единицы давления: физическая нормальная атмосфера (атм) и миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.):

$$1\ \text{атм} = 101\,325\ \text{Па} = 760\ \text{мм рт. ст.}$$

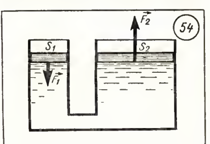
Когда внешние силы действуют на твердые тела, то давление передается в направлении действия силы. Иначе ведут себя при действии внешних сил жидкости и газы.

Закон Паскаля. Паскаль открыл, что все жидкости и газы передают производимое на них давление во все стороны одинаково. Это утверждение называют *законом Паскаля*.

Свойство жидкостей передавать производимое на них давление одинаково во все стороны наглядно демонстрируется в опыте с шаром Паскаля. При вдвигании поршня в трубку часть воды выталкивается из шара в виде струек, вытекающих по нормали к поверхности шара из всех отверстий, а не только в направлении силы давления поршня (рис. 53).



Гидравлическая машина. На основе использования закона Паскаля работают гидравлические машины. Основными частями гидравлической машины являются два цилиндра с поршнями, в цилиндрах под поршнями находится минеральное масло. Цилиндры соединены между собой трубкой, по которой масло может перетекать из одного цилиндра в другой (рис. 54). Площади S_1 и S_2 цилиндров существенно различны, поршни плотно закры-



вают цилиидры. При действии силы F_1 на поршень в узком цилиидре с площадью S_1 в жидкости под поршнем создается давлеиие p, равное

$$p=\frac{F_1}{S_1}.$$

По закоиу Паскаля такое же давлеиие будет внутри жидкости во втором цилиндре. В результате на поршень во втором цилиидре со стороны жидкости действует сила F_2:

$$F_2=pS_2=F_1\frac{S_2}{S_1}.$$

Отсюда

$$\frac{F_2}{F_1}=\frac{S_2}{S_1}. \qquad (15.2)$$

Гидравлическая машина дает выигрыш в силе во столько раз, во сколько площадь ее большого поршия больше площади малого поршия.

Гидравлические машины используются в качестве домкратов для подъема грузов, в прессах для изготовлеиия различных металлических и пластмассовых изделий, в тормозных системах.

Зависимость давления жидкости от высоты столба жидкости. В цилиидрическом сосуде сила давления на дно сосуда равна весу столба жидкости. Давлеиие на дно сосуда равио

$$p=\frac{F_т}{S}=\frac{mg}{S}.$$

Отсюда получаем

$$p=\frac{\rho Vg}{S}=\frac{\rho hSg}{S}=\rho gh. \qquad (15.3)$$

Давление жидкости равно произведению плотиости ρ жидкостн на модуль ускорения свободного падения g и высоту h столба жидкости.

Такое же давление в соответствии с закоиом Паскаля жидкость оказывает и на боковые стеики сосуда на глубине h.

Сообщающиеся сосуды. Равеиство давлеиий жидкости иа одиой и той же высоте приводит к тому, что в сообщающихся сосудах любой формы свободные поверхиости покоящейся одиородиой жидкости иаходятся иа одиом уровие (если влияиие капилляриых сил преиебрежимо мало).

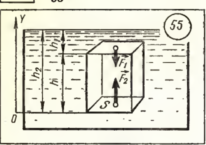
Если же в сообщающиеся сосуды иалиты жидкости с различиой плотиостью, то при равенстве давлений высота столба жидкости с меньшей плотностью будет больше высоты столба жидкости с большей плотностью.

Архимедова сила. Зависимость давлеиия в жидкости или газе от глубины приводит к возникновению выталкивающей силы, действующей иа любое тело, погружеииое в жидкость или газ. Эту силу называют *архимедовой силой.*

Если прямоугольный параллелепипед высотой h и площадью основания S погружен в жидкость плотностью ρ, то силы давлеиия жидкости на его боковые грани уравновешиваются, а равнодействующая сил давлеиия снизу $\vec{F}_2$ и сверху $\vec{F}_1$ (рис. 55) отличиа от нуля и является архимедовой силой:

$$\vec{F}_A=\vec{F}_2+\vec{F}_1,$$

$$F_A=p_2S-p_1S=\rho gh_2S-\rho gh_1S=$$
$$=\rho gS(h_2-h_1)=\rho gSh.$$



Так как $Sh=V$, а $\rho V=m$, то $F_A=mg$, где m — масса вытесненной жидкости.

Сила, выталкивающая погруженное в жидкость (или газ) тело, равна весу жидкости (или газа), вытесненной телом:

$$F_A=mg=\rho Vg, \qquad (15.4)$$

где ρ — плотность жидкости (или газа); V — объем части тела, погруженного в жидкость или газ; g — ускорение свободного падения.

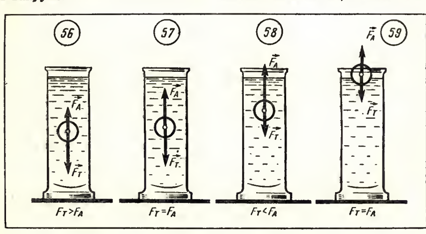
Архимедова сила направлена противоположно силе тяжести; поэтому вес тела при взвешивании в жидкости или газе оказывается меньше веса, измеренного в вакууме.

Условия плавания тел. На тело, находящееся в жидкости или газе, в обычных земных условиях действуют две противоположно направленные силы: сила тяжести и архимедова сила. Если сила тяжести по модулю больше архимедовой силы, то тело опускается вниз — тонет (рис. 56).

Если модуль силы тяжести равен модулю архимедовой силы, то тело может находиться в равновесии на любой глубине (рис. 57).

Если архимедова сила по модулю больше силы тяжести, то тело поднимается вверх — всплывает (рис. 58). Всплывшее тело частично выступает над поверхностью жидкости (рис. 59); объем погруженной части плавающего тела таков, что вес вытесненной жидкости равен весу плавающего тела.

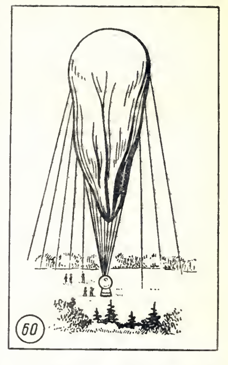
Архимедова сила больше силы тяжести, если плотность жидкости больше плотности погруженного в жидкость тела. Поэтому дерево всплывает в воде. Однако на воде держатся громадные речные и морские суда, изготовленные из стали, плотность ко-



торой почти в 8 раз больше плотности воды. Объясняется это тем, что из стали делают лишь сравнительно тонкий корпус судна, а бо́льшая часть его объема занята воздухом. Среднее значение плотности судна при этом оказывается значительно меньше плотности воды; поэтому оно не только не тонет, но и может принимать для перевозки большое количество грузов.

Воздухоплавание. Наполняя тонкую оболочку газом, плотность которого меньше плотности атмосферного воздуха (гелием, водородом или нагретым воздухом), можно достигнуть выполнения условия плавания тела в воздухе.

Небольшие шары, заполненные водородом или гелием, используются для подъема автоматических метеорологических приборов в верхние слои атмосферы. Большие воздушные шары объемом 20000—30000 м^3 (рис. 60) применяются для подъема людей и научного оборудования на высоту до 20—30 км. К числу летательных аппаратов легче воздуха относятся и дирижабли, снабженные двигательными установками.



Атмосферное давление. Под действием силы тяжести верхние слои воздуха в земной атмосфере давят на нижележащие слои. Это давление согласно закону Паскаля передается по всем направлениям. Наибольшее значение это давление, называемое атмосферным, имеет у поверхности Земли. Оно обусловлено весом всего столба воздуха от поверхности Земли до границы атмосферы.

На уровне моря атмосферное давление равно примерно 10^5 Па, с увеличением высоты над уровнем моря атмосферное давление уменьшается.

Давление 10^5 Па оказывает водяной столб высотой 10 м или столб ртути высотой 760 мм. Если в жидкую ртуть опустить трубку, в которой создан вакуум, то ртуть под действием атмосферного давления поднимется в ней на такую высоту, при которой давление столба жидкости станет равным внешнему атмосферному давлению на открытую поверхность ртути. При изменении атмосферного давления изменяется высота столба жидкости в трубке. Это позволяет использовать такую трубку в качестве прибора для измерения атмосферного давления — ртутного барометра.

16. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Импульс силы. Покой и движение тела относительны, скорость движения тела зависит от выбора системы отсчета. По второму закону Ньютона независимо от того, находилось ли тело в покое или двигалось, изменение скорости его движения может происходить только при действии силы, т. е. в результате взаимодействия с другими телами.

Если на тело массой m в течение времени t действует сила $\vec{F}$ и скорость его движения изменяется от $\vec{v}_0$ до $\vec{v}$, то ускорение $\vec{a}$ движения тела равно

$$\vec{a}=\frac{\vec{v}-\vec{v}_0}{t}.$$

На основании второго закона Ньютона для силы $\vec{F}$ можно написать выражение

$$\vec{F}=m\vec{a}=\frac{m(\vec{v}-\vec{v}_0)}{t}. \quad (16.1)$$

Из равенства (16.1) следует

$$\vec{F}t=m\vec{v}-m\vec{v}_0. \quad (16.2)$$

Физическая величина, равная произведению силы $\vec{F}$ на время t ее действия, называется *импульсом силы*.

Импульс тела. Выражение (16.2) показывает, что имеется физическая величина, одинаково изменяющаяся у всех тел под действием одинаковых сил, если время действия силы одинаково. Эта физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения, называется *импульсом тела* или *количеством движения*.

Изменение импульса тела равно импульсу силы, вызывающей это изменение. Импульс тела является количественной характеристикой поступательного движения тел. За единицу импульса в СИ принят импульс тела массой 1 кг, движущегося поступательно со скоростью 1 м/с. Единицей импульса является *килограмм-метр в секунду* (кг·м/с).

Закон сохранения импульса. Выясним, как изменяются импульсы двух тел при их взаимодействии.

Обозначим скорости тел массами m_1 и m_2 до взаимодействия через $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$, а после взаимодействия — через $\vec{v}_1'$ и $\vec{v}_2'$.

По третьему закону Ньютона силы, действующие на тела при их взаимодействии, равны по модулю и противоположны по направлению; поэтому их можно обозначить $\vec{F}$ и $-\vec{F}$.

Для изменений импульсов тел при их взаимодействии на основании равенства (16.2) можно записать

$$\vec{F}t=m_1\vec{v}_1'-m_1\vec{v}_1,$$

$$-\vec{F}t=m_2\vec{v}_2'-m_2\vec{v}_2,$$

где t — время взаимодействия тел. Из этих выражений получаем

$$m_1\vec{v}_1+m_2\vec{v}_2=m_1\vec{v}_1'+m_2\vec{v}_2'. \quad (16.3)$$

Таким образом, векторная сумма импульсов двух тел до взаимодействия равна векторной сумме их импульсов после взаимодействия.

Экспериментальные исследования взаимодействий различных тел — от планет и звезд до атомов и элементарных частиц — показали, что в любой системе взаимодействующих между собой тел



при отсутствии действия сил со стороны других тел, не входящих в систему, или равенстве нулю суммы действующих сил геометрическая сумма импульсов тел остается неизменной.

Система тел, не взаимодействующих с другими телами, не входящими в эту систему, называется *замкнутой системой*.

В замкнутой системе геометрическая сумма импульсов тел остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой.

Этот фундаментальный закон природы называется *законом сохранения импульса*.

Необходимым условием применимости закона сохранения импульса к системе взаимодействующих тел является использование инерциальной системы отсчета.

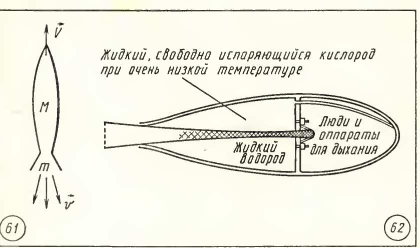
17. РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Знание закона сохранения импульса во многих случаях дает возможность выполнить расчеты результата взаимодействия тел, когда значения действующих сил неизвестны.

Рассмотрим в качестве примера действие реактивного двигателя. При сгорании топлива газы, нагретые до высокой температуры, выбрасываются из сопла ракеты со скоростью $\vec{v}$ (рис. 61).

Ракета и выбрасываемые ее двигателем газы взаимодействуют между собой. На основании закона сохранения импульса при отсутствии внешних сил сумма векторов импульсов взаимодействующих тел остается постоянной. До начала работы двигателей импульс ракеты и горючего был равен нулю; следовательно, и после включения двигателей сумма векторов импульса ракеты и импульса истекающих газов равна нулю:

$$M\vec{V} + m\vec{v} = \vec{0}, \qquad (17.1)$$



где M — масса ракеты; $\vec{V}$ — скорость ракеты; m — масса выброшенных газов; $\vec{v}$ — скорость истечения газов.

Отсюда получаем

$$m\vec{V} = -m\vec{v}, \qquad (17.2)$$

а для модуля V скорости ракеты имеем

$$V = \frac{m}{M} v. \qquad (17.3)$$

Эта формула применима для вычисления модуля скорости V ракеты при условии небольшого изменения массы M ракеты в результате работы ее двигателей.

Реактивный двигатель обладает многими замечательными особенностями, но главная из них заключается в следующем. Автомобилю для движения, кроме двигателя, нужна еще и дорога, с которой могли бы взаимодействовать колеса, теплоходу — вода, а самолету — воздух. Ракете для движения не нужны ни земля, ни вода, ни воздух, так как она движется в результате взаимодействия с газами, образующимися при сгорании топлива. Поэтому ракета может двигаться в безвоздушном космическом пространстве.

К. Э. Циолковский — основоположник теории космических полетов. Научное доказательство возможности использования ракеты для полетов в космическое пространство, за пределы земной атмосферы и к другим планетам Солнечной системы было дано впервые русским ученым и изобретателем Константином Эдуардовичем Циолковским (1857—1935). В его труде «Исследование мировых пространств реактивными приборами», опубликованном в 1903 г., была выведена формула, устанавливающая связь между скоростью ракеты, скоростью истечения газов, массой ракеты и массой горючего. Циолковский теоретически обосновал возможность создания ракеты, способной разогнаться до скорости 8 км/с и улететь в космическое пространство. В качестве горючего для такой ракеты он предлагал использовать жидкий водород, а в качестве окислителя — жидкий кислород. Конструкция жидкостной ракеты, по К. Э. Циолковскому, представлена на рисунке 62. В 1929 г. К. Э. Циолковский разработал идею создания «космических ракетных поездов». Теоретические работы К. Э. Циолковского более чем на полвека опередили уровень развития техники. Эти работы послужили основой для создания современной теоретической и практической космонавтики.

Успехи СССР в освоении космического пространства. Идеи К. Э. Циолковского о создании «космических ракетных поездов» — многоступенчатых ракет — были осуществлены советскими учеными и техниками под руководством выдающегося советского ученого, академика Сергея Павловича Королева (1907—1966).

Первый в мире искусственный спутник Земли был с помощью ракеты запущен в Советском Союзе 4 октября 1957 г.

12 апреля 1961 г. гражданин Советского Союза Юрий

Алексеевич Гагарин (1934—1968) на космическом корабле «Восток» совершил первый в мире полет в космическом пространстве.

Советские космические ракеты доставили на Землю образцы грунта с поверхиости Луны, осуществили мягкую посадку автоматических межпланетных станций на поверхность Венеры и Марса, вывели на околоземиую орбиту долговременные орбитальные станции.

Полеты космических кораблей с космоиавтами на борту, автоматических межпланетных станций и искусственных спутников Земли используются как для научных исследований в околоземном и межплаиетном пространстве, так и для решения практических задач народного хозяйства.

С помощью спутников и автоматических межпланетных стаиций изучеиы состав и строеиие атмосферы Земли на больших высотах, химический состав и физические свойства атмосферы Венеры и Марса, получены изображеиия поверхности Луиы, Веиеры и Марса.

Спутники связи «Молния» через наземные станции «Орбита» осуществляют трансляцию телевизионных программ и телефоиную связь на любых расстояниях в пределах нашей страны.

Метеорологические спутники «Метеор» используются для исследования процессов, происходящих в земиой атмосфере, и составления прогнозов погоды.

Специальиые спутники помогают морским судам и самолетам определять свои координаты. Исследоваиия поверхиости материков и океаиов, выполияемые космонавтами при полетах иа орбитальных станциях, позволяют оцеиить и уточнить природиые ресурсы в различиых районах земного шара.

18. МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА

Работа постоянной силы. Работой A постоянной силы $\vec{F}$ называется физическая величина, равная произведению модулей силы и перемещения, умиожеииому на косинус угла α между векторами силы $\vec{F}$ и перемещения $\vec{s}$:

$$A = Fs \cos \alpha. \qquad (18.1)$$

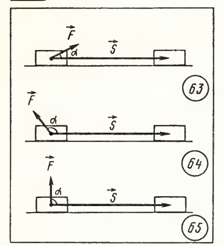
Выражеиие (18.1) показывает, что работа является скалярной величиной и может иметь положительное или отрицательное значение в зависимости от знака косинуса угла α.

Работа, совершаемая силой $\vec{F}$, положительна, если угол α между вектором силы $\vec{F}$ и вектором перемещеиия $\vec{s}$ меньше 90° (рис. 63).

При зиачениях угла $90° < \alpha \leq 180°$ работа силы отрицательна (рис. 64).

Если вектор силы $\vec{F}$ перпендикулярен вектору перемещеиия $\vec{s}$, то косинус угла α равен нулю и работа силы $\vec{F}$ равна нулю (рис. 65).

Единица работы в СИ называется *джоулем* (Дж).



Джоуль равен работе, совершаемой силой 1 Н при перемещении точки ее приложения на 1 м в направлении действия силы:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Мощность. Мощность N — физическая величина, равная отношению работы A к промежутку времени t, в течение которого она совершена:

$$N = \frac{A}{t}. \qquad (18.2)$$

Единица мощности в СИ называется *ваттом* (Вт).

Ватт равен мощности, при которой совершается работа 1 Дж за время 1 с:

$$1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

В технике пользуются более крупными единицами — киловаттом и мегаваттом:

$$1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт},$$

$$1 \text{ МВт} = 10^6 \text{ Вт}.$$

Работа, совершаемая за 1 ч при мощности в 1 кВт, называется киловатт-часом:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 10^3 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3{,}6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

19. КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Работа и изменение скорости тела. Установим связь между работой постоянной силы и изменением скорости тела. Рассмотрим случай, когда на тело массой m действует постоянная сила $\vec{F}$ (она может быть равнодействующей нескольких сил) и векторы силы $\vec{F}$ и перемещения $\vec{s}$ направлены вдоль одной прямой в одну сторону. В этом случае работу силы можно определить как $A = Fs$. Модуль силы по второму закону Ньютона равен $F = ma$, а модуль перемещения $\vec{s}$ при равноускоренном прямолинейном движении связан с модулями начальной $\vec{v}_1$ и конечной $\vec{v}_2$ скорости и ускорения $\vec{a}$ выражением $s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$.

Отсюда для работы получаем

$$A = Fs = ma\frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \qquad (19.1)$$

Кинетическая энергия. Физическая величина, равная половине произведения массы тела на квадрат его скорости, называется *кинетической энергией* тела.

Кинетическая энергия тела обозначается буквой E_k:

$$E_k=\frac{mv^2}{2}. \qquad (19.2)$$

Тогда равенство (19.1) можно записать в таком виде:

$$A=E_{k2}-E_{k1}. \qquad (19.3)$$

Работа равнодействующей сил, приложенных к телу, равна изменению кинетической энергии тела. Это утверждение называют теоремой о кинетической энергии.

Так как изменение кинетической энергии равно работе силы (19.3), кинетическая энергия выражается в тех же единицах, что и работа, т. е. в джоулях.

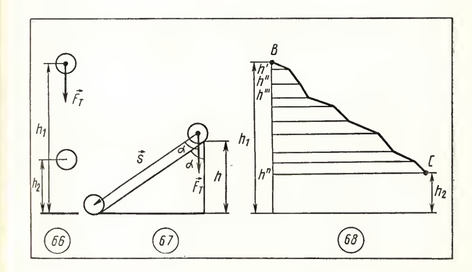
Если начальная скорость движения тела массой m равна нулю и тело увеличивает свою скорость до значения v, то работа силы равна конечному значению кинетической энергии тела:

$$A=E_{k2}-E_{k1}=\frac{mv^2}{2}-0=\frac{mv^2}{2}. \qquad (19.4)$$

Кинетическая энергия тела массой m, движущегося со скоростью v, равна работе, которую должна совершить сила, действующая на покоящееся тело, чтобы сообщить ему эту скорость.

20. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Работа силы тяжести. Найдем работу, совершаемую силой тяжести $\vec{F}_т$ при перемещении тела массой m вертикально вниз с высоты h_1 над поверхностью Земли до высоты h_2 (рис. 66). Если разность h_1-h_2 пренебрежимо мала по сравнению с расстоянием до центра Земли, то силу тяготения $\vec{F}_т$ во время движения тела можно считать постоянной и равной $m\vec{g}$.



Так как перемещение совпадает по направлению с вектором силы тяжести, работа силы тяжести равна

$$A=Fs=mg(h_1-h_2). \quad (20.1)$$

Рассмотрим теперь движение тела по наклонной плоскости. При перемещении тела вниз по наклонной плоскости (рис. 67) сила тяжести $\vec{F}_т=m\vec{g}$ совершает работу

$$A=mgs\cos\alpha=mgh, \quad (20.2)$$

где h — высота наклонной плоскости, s — модуль перемещения, равный длине наклонной плоскости.

Движение тела из точки B в точку C по любой траектории (рис. 68) можно мысленно представить состоящим из перемещений по участкам наклонных плоскостей с различными высотами h', h'' и т. д. Работа A силы тяжести на всем пути из B в C равна сумме работ на отдельных участках пути:

$$A=mgh'+mgh''+...+mgh^n=$$
$$=mg(h'+h''+...+h^n)=$$
$$=mg(h_1-h_2), \quad (20.3)$$

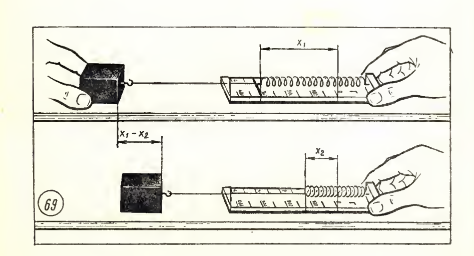
где h_1 и h_2 — высоты от поверхности Земли, на которых расположены соответственно точки B и C.

Равенство (20.3) показывает, что **работа силы тяжести не зависит от траектории движения тела и всегда равна произведению модуля силы тяжести на разность высот в начальном и конечном положениях.**

При движении вниз работа силы тяжести положительна, при движении вверх — отрицательна.

Если после движения по какой-либо траектории тело возвращается в исходную точку, начальное h_1 и конечное h_2 значения высоты совпадают и работа силы тяжести оказывается равной нулю.

Работа силы тяжести на замкнутой траектории равна нулю.



Потенциальная энергия тела, на которое действует сила тяжести. Равенство (20.3) можно представить в таком виде:

$$A = -(mgh_2 - mgh_1). \quad (20.4)$$

Оно показывает, что работа силы тяжести при перемещении тела массой m из точки, расположенной на высоте h_1, в точку, расположенную на высоте h_2 от поверхности Земли, по любой траектории равна изменению некоторой физической величины, равной произведению mgh, взятому с противоположным знаком.

Физическую величину, равную произведению массы тела на модуль ускорения свободного падения и на высоту, на которую поднято тело над поверхностью Земли, называют *потенциальной энергией тела.*

Потенциальная энергия обозначается буквой E_p.

Работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии тела, взятому с противоположным знаком:

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}). \quad (20.5)$$

Значение потенциальной энергии тела, поднятого над Землей, зависит от выбора нулевого уровня, т. е. высоты, на которой потенциальная энергия принимается равной нулю. Обычно принимают, что потенциальная энергия тела на поверхности Земли равна нулю.

При таком выборе нулевого уровня потенциальная энергия E_p тела, находящегося на высоте h над поверхностью Земли, равна произведению массы m тела на модуль ускорения свободного падения $\vec{g}$ и расстояние h его от поверхности Земли:

$$E_p = mgh. \quad (20.6)$$

Равенство (20.6) показывает, что потенциальная энергия тела, на которое действует сила тяжести, равна работе, совершаемой силой тяжести при перемещении тела на нулевой уровень.

В отличие от кинетической энергии поступательного движения, которая может иметь лишь положительные значения, потенциальная энергия тела может быть как положительной, так и отрицательной. Тело массой m, находящееся на глубине h от поверхности Земли, обладает отрицательной потенциальной энергией:

$$E_p = -mgh.$$

Работа силы упругости. Если к пружине с жесткостью k прикрепить брусок, растянуть пружину и затем отпустить брусок, то под действием силы упругости растянутой пружины брусок придет в движение и переместится на некоторое расстояние.

Вычислим работу, совершаемую силой упругости при изменении деформации (удлинения) пружины от некоторого начального значения x_1 до конечного значения x_2 (рис. 69).

Сила упругости изменяется в процессе деформации пружины. Для нахождения работы силы упругости можно взять среднее значение модуля силы и умножить на модуль перемещения:

$$A = F_{\text{у. ср}} (x_1 - x_2). \quad (20.7)$$

Так как сила упругости по закону Гука пропорциональна деформации пружины, средиее значение ее модуля равио

$$F_{\text{у. ср}} = k\frac{x_1+x_2}{2}. \quad (20.8)$$

Подставив в равенство (20.7) вместо $F_{\text{у. ср}}$ ее значеиие из (20.8), получим

$$A = k\frac{x_1+x_2}{2}(x_1-x_2) =$$

$$= \frac{k}{2}(x_1^2 - x_2^2) \quad (20.9)$$

или

$$A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right). \quad (20.10)$$

Потенциальная энергия упруго деформированного тела. Физическая величина, равиая половине произведения жесткости тела на квадрат его деформации, иазывается *потенциальной энергией упруго деформированного тела:*

$$E_p = \frac{kx^2}{2}. \quad (20.11)$$

Из формул (20.10) и (20.11) следует, что работа силы упругости равиа измеиению потенциальной энергии упруго деформированиого тела, взятому с противоположным зиаком:

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}). \quad (20.12)$$

Если $x_2=0$ и $x_1=x$, то, как видно из формул (20.10) и (20.11),

$$E_p = A,$$

т. е. потенциальная энергия упруго деформированного тела равна работе, которую совершает сила упругости при переходе тела в состояиие, в котором деформация равна нулю.

Потенциальная энергия. Рассмотрение примеров взаимодействия тел силами тяготения и силами упругости позволяет обиаружить следующие призиаки потенциальной энергии:

Потеициальиой эиергией не может обладать одно тело, не взаимодействующее с другими телами. *Потенциальная энергия — это энергия взаимодействия тел.*

Потеициальиая энергия поднятого над Землей тела — это эиергия взаимодействия тела и Земли гравитациоииыми силами. Потенциальиая эиергия упруго деформированного тела — это энергия взаимодействия отдельных частей тела между собой силами упругости.

21. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Мы устаиовили, что потенциальная энергия характеризует взаимодействующие тела, а кииетическая эиергия — движущиеся тела. И потенциальиая, и кинетическая эиергия измеияются только в результате такого взаимодействия тел, при котором действующие на тела силы совершают работу, отличную от иуля.

Рассмотрим теперь вопрос об изменеииях энергии при взаимо-

действиях тел, образующих замкнутую систему. Если несколько тел взаимодействуют между собой только силами тяготения и силами упругости и никакие внешние силы на них не действуют, то при любых взаимодействиях тел работа сил упругости или сил тяготения равна изменению потенциальной энергии тел, взятому с противоположным знаком:

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}). \quad (21.1)$$

Вместе с тем по теореме о кинетической энергии работа тех же сил равна изменению кинетической энергии:

$$A = E_{k2} - E_{k1}. \quad (21.2)$$

Из сравнения равенств (21.1) и (21.2) видно, что изменение кинетической энергии тел в замкнутой системе равно по абсолютному значению изменению потенциальной энергии системы тел и противоположно ему по знаку:

$$E_{k2} - E_{k1} = -(E_{p2} - E_{p1})$$

или

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}. \quad (21.3)$$

Из равенства (21.3) следует, что **сумма кинетической и потенциальной энергии тел, составляющих замкнутую систему и взаимодействующих между собой силами тяготения и силами упругости, остается постоянной.** Это утверждение называется *законом сохранения энергии в механических процессах.*

Сумма кинетической и потенциальной энергии тел называется *полной механической энергией.*

Для полной механической энергии закон сохранения энергии имеет следующее выражение: **полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих силами тяготения и упругости, остается неизменной.**

Основное содержание закона сохранения энергии заключается не только в установлении факта сохранения полной механической энергии, но и в установлении возможности взаимных превращений кинетической и потенциальной энергии тел в равной количественной мере при взаимодействии тел.

Закон сохранения энергии раскрывает физический смысл понятия работы.

Работа сил тяготения и сил упругости, с одной стороны, равна увеличению кинетической энергии, а с другой стороны, — уменьшению потенциальной энергии тел.

Следовательно, *работа равна энергии, превратившейся из одного вида в другой.*

Закон сохранения полной механической энергии в процессах с участием сил упругости и гравитационных сил является одним из основных законов механики. Знание этого закона упрощает решение многих задач, имеющих большое значение в практической жизни.

Рассмотрим такой пример. Для получения электроэнергии широко используется энергия рек. С этой целью строят плотины, перегораживающие реки. Под действием силы тяжести вода из водохранилища за плотиной движется вниз по колодцу ускоренно и приобретает некоторую кинетическую энергию. При столкновении быстро движущегося потока воды с лопатками гидравлической турбины происходит преобразование кинетической энергии поступательного движения воды в кинетическую энергию вращения ротора турбины, а затем с помощью электрического генератора в электрическую энергию.

Для расчетов производства электроэнергии гидроэлектростанцией прежде всего необходимо уметь определять кинетическую энергию потока воды, направляющегося на лопатки турбины. Так как вода не падает на лопатки турбины вертикально сверху вниз, а движется по колодцам сложной формы, то расчеты изменения скорости воды на каждом участке ее движения с учетом действия сил тяжести и сил упругости были бы очень сложными. Однако в таких расчетах нет необходимости. Так как на воду действуют только силы тяжести и силы упругости, изменение ее кинетической энергии ΔE_k при любой траектории движения равно изменению ее потенциальной энергии ΔE_p, взятому с противоположным знаком:

$$\Delta E_k = -\Delta E_p.$$

Изменение потенциальной энергии воды массой m при уменьшении ее высоты над поверхностью Земли на h определяется соотношением

$$\Delta E_p = -mgh.$$

Силы упругости при движении воды в колодцах работы не совершают, так как их направление в любой точке перпендикулярно вектору перемещения. Поэтому изменение кинетической энергии ΔE_k воды равно изменению ее потенциальной энергии в поле силы тяжести:

$$\Delta E_k = -\Delta E_p = mgh.$$

Превращения энергии. Механическая энергия сохраняется не при любых взаимодействиях тел. Закон сохранения механической энергии не выполняется, если между телами действуют силы трения.

Автомобиль, двигавшийся по горизонтальному участку дороги, после выключения двигателя проходит некоторый путь и под действием сил трения останавливается. Кинетическая энергия поступательного движения автомобиля стала равной нулю, а потенциальная энергия не увеличилась. Не означает ли это, что кинетическая энергия автомобиля исчезла бесследно?

Опыт показывает, что механическое движение никогда не исчезает бесследно и никогда оно не возникает само собой. Во время торможения автомобиля произошло нагревание тормозных колодок, шин автомобиля и асфаль-

та. Следовательно, в результате действия сил трения кинетическая энергия автомобиля не исчезла, а превратилась во внутреннюю энергию теплового движения молекул.

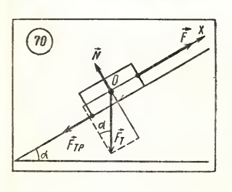
При любых физических взаимодействиях энергия не возникает и не исчезает, а только превращается из одной формы в другую.

Этот экспериментально установленный факт называется *законом сохранения и превращения энергии.*

Простые механизмы. Помощниками человека на протяжении тысячелетий были такие простые механизмы, как наклонная плоскость, рычаг и колесо. Принцип *наклонной плоскости* использовали еще строители египетских пирамид. Например, при строительстве пирамиды Хеопса каменные блоки массой 2,5 т поднимались на высоту до 147 м.

Наклонная плоскость применяется для того, чтобы тело большой массы можно было перемещать действием силы, значительно меньшей веса тела.

Выбрав ось OX параллельной наклонной плоскости, найдем (рис. 70), что для равномерного



перемещения тела массой m вверх по наклонной плоскости под углом α к горизонтальной плоскости нужно приложить силу $\vec{F}$, равную по модулю:

$$F = F_{тx} + F_{трx} = mg\sin\alpha + F_{тр} = mg\sin\alpha + \mu mg\cos\alpha.$$

Если силами трения можно пренебречь, то отношение модуля силы $\vec{F}$, обеспечивающей движение тела по наклонной плоскости, к модулю силы тяжести $\vec{F}_т$ равно

$$\frac{F}{F_т} = \frac{mg\sin\alpha}{mg} = \sin\alpha = \frac{h}{l}.$$

Мы получили, что при отсутствии трения применение наклонной плоскости позволяет уменьшить значение силы, необходимой для перемещения тела по наклонной плоскости, во столько раз, во сколько высота h наклонной плоскости меньше ее длины l.

Однако выигрыша в работе наклонная плоскость не дает, так как путь l увеличивается во столько раз, во сколько уменьшается модуль действующей силы $\vec{F}$:

$$A = Fs = mg\frac{h}{l}l = mgh.$$

Точно такая же работа совершается при вертикальном подъеме тела на высоту h.

Этот результат является следствием закона сохранения механической энергии, так как работа силы тяжести не зависит от формы пути и равна изменению потенциальной энергии тела.

Для подъема тяжелых предметов человек с давних пор научился применять *рычаги*.

Рычаг находится в равновесии, если момент сил, вращающих его в направлении по часовой стрелке, равен по абсолютному значению моменту сил, вращающих рычаг в противоположном направлении. Если направления векторов сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ перпендикулярны кратчайшим прямым, соединяющим точки приложения сил и ось вращения, и лежат в одной плоскости, то условие равенства моментов сил принимает вид

$$F_1l_1=F_2l_2,$$

где l_1 и l_2 — расстояние от точек приложения сил до точки опоры рычага, т. е. оси вращения (рис. 71).

Если $l_1>l_2$, то рычаг может обеспечить выигрыш в силе в $\frac{l_1}{l_2}$ раз:

$$F_2=F_1\frac{l_1}{l_2}.$$

Получение с помощью рычага выигрыша в силе не означает выигрыша в работе. При повороте рычага вокруг точки опоры на угол α сила $\vec{F}_1$ совершает работу

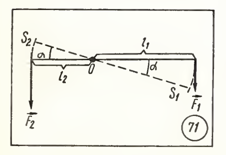
$$A_1=F_1s_1=F_1l_1\alpha,$$

сила $\vec{F}_2$ совершает работу

$$A_2=F_2s_2=F_2l_2\alpha.$$

Так как $F_1l_1=F_2l_2$, то работа A_1, совершенная силой $\vec{F}_1$, равна работе A_2, совершенной силой $\vec{F}_2$:

$$A_1=A_2.$$

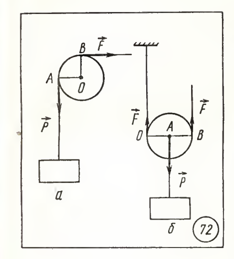


Равенство работ A_1 и A_2 есть следствие закона сохранения механической энергии. Во сколько раз рычаг дает выигрыш в силе, во столько раз дает проигрыш в расстоянии.

Рычаг является элементом многих современных орудий труда: от ножниц и плоскогубцев до рукоятки ручного тормоза автомобиля и стрелы подъемного крана.

Небольшое колесо, укрепленное на неподвижной оси, используется в качестве *блока*. Блок позволяет изменять направление действия силы. Плечи сил, приложенных к разным точкам неподвижного блока, одинаковы, поэтому неподвижный блок не дает выигрыша в силе (рис. 72, *а*).

При подъеме груза весом $\vec{P}$ с помощью подвижного блока получается выигрыш в силе в два раза, так как плечо *OA* силы $\vec{P}$ в два раза меньше плеча *OB* силы $\vec{F}$ натяжения троса (рис. 72, *б*). При вытягивании троса на длину l груз поднимается лишь на высоту $\frac{l}{2}$; следовательно, и по-



движный блок не дает выигрыша в работе.

При рассмотрении действия любых простых механизмов можно убедиться, что ни один из них не дает выигрыша в работе. Любая сложная машина, являющаяся комбинацией взаимодействующих между собой рычагов, колес и других деталей, не может дать выигрыша в работе. Этот вывод является следствием закона сохранения и превращения энергии.

Механизмы и инструменты облегчают труд человека, преобразуя движение и изменяя приложенные силы. Но ни один механизм не может совершить бо́льшую работу, чем совершают внешние силы для приведения его в действие.

Энергетические машины. В своей практической жизни человек постоянно сталкивается с необходимостью превращений различных видов энергии. Преобразование энергии происходит при строительстве дома и добыче каменного угля, обработке почвы и уборке урожая, изготовлении различных деталей на станках и поездке на автомобиле. Устройства, предназначенные для преобразования энергии, называются *энергетическими машинами.*

Энергетическими машинами являются паровая машина, двигатель внутреннего сгорания, турбина, электрический генератор, электродвигатель. Паровая машина и двигатель внутреннего сгорания преобразуют внутреннюю энергию горючего в механическую энергию, электрический генератор преобразует механическую энергию в электрическую, электродвигатель преобразует электрическую энергию в механическую.

Коэффициент полезного действия. Каждый вид энергии может превратиться полностью в любой другой вид энергии. Однако во всех реальных энергетических машинах, кроме преобразований энергии, для которых применяются эти машины, происходят превращения энергии, которые называют потерями энергии.

Чем меньше потерь энергии, тем совершеннее машина. Степень совершенства машины характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД).

Коэффициентом полезного действия η — греческая буква («эта») машины называется отношение полезно используемой энергии $E_{\text{полезн.}}$ к энергии E, подводимой к данной машине:

$$\eta = \frac{E_{\text{полезн.}}}{E}.$$

Формулы

Равноускоренное прямолинейное движение

$$\vec{v}_{\Delta t \to 0}=\frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t}, \qquad \vec{a}_{\Delta t \to 0}=\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}, \qquad {v_x}_{\Delta t \to 0}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=x',$$

$$\vec{v}=\vec{v}_0+\vec{a}t, \qquad v_x=v_{0x}+a_xt, \qquad \vec{s}=\vec{v}_0t+\frac{\vec{a}t^2}{2}.$$

$${a_x}_{\Delta t \to 0}=\frac{\Delta v_x}{\Delta t}=v_x'=x'', \qquad x=x_0+v_{0x}t+\frac{a_xt^2}{2}, \qquad s_x=v_{0x}t+\frac{a_xt^2}{2}.$$

$$v_{0x}=0, \qquad s=\frac{a_xt^2}{2}=\frac{v_x^2}{2a_x}, \qquad v_x=\sqrt{2a_xs_x}, \qquad a_x=\frac{v_x^2}{2s_x}.$$

Равномерное движение по окружности

$$T=\frac{2\pi R}{v}, \quad \nu=\frac{1}{T}, \quad v=2\pi\nu R=\frac{2\pi R}{T}, \quad a=\frac{v^2}{R}=4\pi^2R\nu^2=\frac{4\pi^2R}{T^2}.$$

Второй закон Ньютона

$$\vec{F}=m\vec{a}.$$

Третий закон Ньютона

$$\vec{F}_1=-\vec{F}_2.$$

Закон всемирного тяготения

$$F_т=G\frac{m_1m_2}{R^2}.$$

Закон Гука

$$(F_у)_x=-kx.$$

Сила трения

$$F_{тр}=\mu N.$$

Сила и импульс

$$\vec{F}t=m\vec{v}-m\vec{v}_0.$$

Закон сохранения импульса

$$m_1\vec{v}_1+m_2\vec{v}_2=m_1\vec{v}_1'+m_2\vec{v}_2'.$$

Механическая работа

$$A=Fs\cos\alpha.$$

Мощность

$$N=\frac{A}{t}.$$

Кинетическая энергия

$$E_k=\frac{mv^2}{2}.$$

Теорема о кинетической энергии

$$A=E_{k2}-E_{k1}.$$

Потенциальная энергия

$$A=-\Delta E_p; \quad E_p=mgh; \quad E_p=\frac{kx^2}{2}.$$

Закон сохранения энергии в механических процессах

$$E_{k1}+E_{p1}=E_{k2}+E_{p2}.$$

	Обозначения	Единицы и значения величин
	$\vec{s}$ — перемещение s — модуль перемещения s_x — проекция перемещения x — координата	 1 м
	t — время	1 с
	$\vec{v}$ — скорость v — модуль скорости v_x — проекция скорости	1 м/с
	$\vec{a}$ — ускорение a — модуль ускорения a_x — проекция ускорения	 1 м/с^2
	T — период обращения ν — частота обращения m — масса	1 с 1/с 1 кг
	$\vec{F}$ — сила G — гравитационная постоянная k — жесткость тела	1 Н $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н·м^2/кг^2 1 Н/м
	$\vec{N}$ — сила реакции опоры μ — коэффициент трения $\vec{F}t$ — импульс силы $m\vec{v}$ — импульс тела (количество движения) A — механическая работа N — мощность E — энергия	 1 кг·м/с 1 Дж 1 Вт 1 Дж

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. После удара о поверхность Земли мяч движется вертикально вверх со скоростью 15 м/с. Найдите координату мяча над поверхностью Земли через 1 с и через 2 с после начала движения. Дайте объяснение полученному результату.

Решение

$v_0 = 15$ м/с
$g = 10$ м/с^2
$h_0 = 0$ м
$t_1 = 1$ с
$t_2 = 2$ с

y_1 — ?
y_2 — ?

Координата тела при равноускоренном прямолинейном движении определяется по формуле

$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}.$$

Координатную ось OY направим по вертикали вверх, начало отсчета находится на поверхности Земли. Тогда $y_0 = h_0 = 0$.

Так как направление вектора начальной скорости $\vec{v}_0$ совпадает с направлением оси OY, а направление вектора $\vec{g}$ противоположно направлению оси OY, то проекция начальной скорости v_{0y} положительна, а ускорения a_y отрицательна: $v_{0y} = y_0$, $a_y = -g$.

Тогда $$y = v_0 t - \frac{gt^2}{2};$$

$$y_1 = 15 \text{ м/с} \cdot 1 \text{ с} - \frac{10 \text{ м/с}^2 \cdot 1 \text{ с}^2}{2} = 10 \text{ м},$$

$$y_2 = 15 \text{ м/с} \cdot 2 \text{ с} - \frac{10 \text{ м/с}^2 \cdot 4 \text{ с}^2}{2} = 10 \text{ м}.$$

Через 1 с и через 2 с после начала движения мяч находится в одной и той же точке пространства. В момент времени $t_1 = 1$ с он проходит через эту точку во время движения вверх, в момент времени $t_2 = 2$ с — во время движения вниз.

2. Лодка движется перпендикулярно берегу реки. Ее скорость относительно воды равна 2 м/с. Определите время движения лодки к другому берегу, если ширина реки 80 м, а скорость течения 1 м/с.

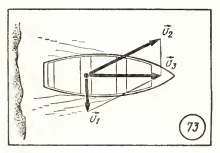
Решение

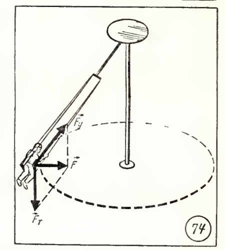
$v_1 = 1$ м/с
$v_2 = 2$ м/с
$s = 80$ м
$\vec{v}_3 \perp \vec{v}_1$

t — ?

Для нахождения времени движения лодки через реку необходимо найти скорость лодки относительно берега. Скорость $\vec{v}_3$ лодки относительно берега равна сумме векторов $\vec{v}_1$ (скорости течения воды) и $\vec{v}_2$ (скорости лодки относительно воды):

$$\vec{v}_3 = \vec{v}_1 + \vec{v}_2.$$





Вектор $\vec{v}_3$ скорости лодки относительно берега перпендикулярен вектору $\vec{v}_1$ скорости течения реки. В векторном треугольнике (рис. 73) они являются катетами, а вектор $\vec{v}_2$ — гипотенузой. Модуль вектора $\vec{v}_3$ из этого треугольника равен

$$v_3=\sqrt{v_2^2-v_1^2};$$

$$v_3=\sqrt{4\ \text{м}^2/\text{с}^2-1\ \text{м}^2/\text{с}^2}=\sqrt{3}\ \text{м/с}\approx 1{,}73\ \text{м/с}.$$

Время t движения лодки от одного берега к другому равно

$$t=\frac{s}{v};\qquad t=\frac{80\ \text{м}}{1{,}73\ \text{м/с}}\approx 46\ \text{с}.$$

3. Человек массой 60 кг катается на карусели. Найдите значение силы упругости, действующей на человека при его движении в горизонтальной плоскости со скоростью 10 м/с по окружности радиусом 12 м.

Решение

$m=60$ кг
$v=10$ м/с
$R=12$ м

F_y — ?

Движение человека по окружности, лежащей в горизонтальной плоскости, происходит под действием равнодействующей $\vec{F}$ сил тяжести $\vec{F}_т$ и упругости $\vec{F}_y$. Вектор $\vec{F}$ лежит в горизонтальной плоскости и направлен к центру окружности (рис. 74).

По второму закону Ньютона модуль равнодействующей равен

$$F=ma=\frac{mv^2}{R}.$$

Так как вектор $\vec{F}$ перпендикулярен вектору $\vec{F}_т$, то вектор $\vec{F}_у$ является гипотенузой в прямоугольном треугольнике с катетами $\vec{F}$ и $\vec{F}_т$. Модуль вектора силы упругости равен

$$F_у=\sqrt{F_т^2+F^2}=\sqrt{m^2g^2+\frac{m^2v^4}{R^2}}=m\sqrt{g^2+\frac{v^4}{R^2}};$$

$$F_у=60 \text{ кг}\cdot\sqrt{100 \text{ м}^2/\text{с}^4+\frac{10^4 \text{ м}^4/\text{с}^4}{144 \text{ м}^2}}\approx 60 \text{ кг}\cdot 13 \text{ м/с}^2=780 \text{ Н}.$$

4. Велосипедист массой 80 кг движется со скоростью 10 м/с по вогнутому мосту, траектория его движения является дугой окружности радиусом 20 м. Определите силу упругости, действующую на велосипедиста в нижней точке моста.

Решение

$m=80$ кг
$v=10$ м/с
$R=20$ м

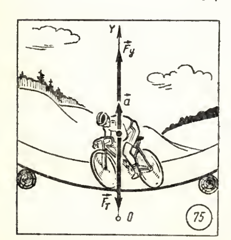
$F_у$ — ?

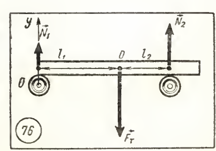
Движение велосипедиста по дуге окружности является движением с центростремительным ускорением $\vec{a}$, равным по модулю

$$a=\frac{v^2}{R}.$$

В нижней точке моста вектор центростремительного ускорения направлен вертикально вверх. Это ускорение по второму закону Ньютона определяется равнодействующей векторов силы тяжести $\vec{F}_т=m\vec{g}$, направленной вертикально вниз, и силы упругости $\vec{F}_у$, действующей со стороны моста и направленной вертикально вверх (рис. 75):

$$m\vec{g}+\vec{F}_у=m\vec{a}.$$





Направим ось OY вертикально вверх и запишем это уравнение в проекциях на эту ось

$$mg_y + (F_y)_y = ma_y.$$

Проекции векторов $\vec{F}_y$ и $\vec{a}$ на эту ось положительны, а проекция вектора $\vec{g}$ отрицательна, поэтому уравнение для модулей сил имеет вид

$$-mg + F_y = ma.$$

Отсюда получаем формулу для вычисления модуля силы упругости $\vec{F}_y$

$$F_y = ma + mg = m(a+g) = m\left(\frac{v^2}{R} + g\right);$$

$$F_y = 80\ \text{кг}\left(\frac{100\ \text{м}^2/\text{с}^2}{20\ \text{м}} + 10\ \text{м/с}^2\right) = 1200\ \text{Н}.$$

5. Труба массой 100 кг лежит на двух горизонтальных опорах. Длина трубы 6 м, одна опора находится у конца трубы, вторая — на расстоянии 1 м от второго конца трубы. Определите силы реакции опор.

Решение

Изобразим все действующие на трубу силы (рис. 76). Сила тяжести $\vec{F}_т$ направлена вертикально вниз и приложена к центру масс трубы, находящемуся на равных расстояниях от концов трубы. Силы реакции опор $\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$ направлены вертикально вверх. Так как труба не движется поступательно, геометрическая сумма векторов сил, действующих на трубу, равна нулю:

$$\vec{F}_т + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 = \vec{0}.$$

Направим ось OY вертикально вверх. Тогда для проекций сил на эту ось имеем равенство

$$F_{тy} + N_{1y} + N_{2y} = 0,$$

а для модулей —

$$F_т = N_1 + N_2.$$

Так как труба не вращается, алгебраическая сумма моментов всех сил, действующих на нее, равна нулю для любой оси вращения. Выберем в качестве оси вращения горизонтальную прямую, проходящую через центр масс трубы перпендикулярно плоскости чертежа. На основании правила моментов запишем равенство

$$N_1 l_1 - N_2 l_2 + F_т l_3 = 0.$$

Так как вектор $\vec{F}_т$ силы тяжести проходит через ось вращения ($l_3=0$), момент этой силы равен нулю. Вектор силы $\vec{N}_2$ реакции опоры создает вращение против часовой стрелки, поэтому вращательный момент этой силы взят с отрицательным знаком. Таким образом, для решения задачи мы получили систему из двух уравнений

$$F_т=N_1+N_2,$$
$$N_1l_1=N_2l_2.$$

Решаем эту систему:

$$N_1=\frac{N_2l_2}{l_1}, \quad F_т=N_2\frac{l_2}{l_1}+N_2=N_2\left(\frac{l_2}{l_1}+1\right).$$

$$N_2=\frac{F_т}{\frac{l_2}{l_1}+1}=\frac{mg}{\frac{l_2}{l_1}+1}.$$

По условию задачи $l_1=3$ м, $l_2=2$ м, поэтому

$$N_2=\frac{100\ кг\cdot 10\ м/с^2}{\frac{2\ м}{3\ м}+1}=600\ Н.$$

$$N_1=\frac{600\ Н\cdot 2\ м}{3\ м}=400\ Н.$$

6. Тепловоз массой 130 т приближается со скоростью 2 м/с к неподвижному составу массой 1170 т. С какой скоростью будет двигаться состав после сцепления с тепловозом?

Решение

$m_1=130\ т=1{,}3\cdot 10^5$ кг
$v_1=2$ м/с
$v_2=0$ м/с
$m_2=1170\ т=$
$=1{,}17\cdot 10^6$ кг
$m_3=m_1+m_2$

---

v_3 — ?

По закону сохранения импульса проекции вектора полного импульса системы из тепловоза и состава на ось координат, направленную по вектору скорости, до сцепления и после сцепления одинаковы:

$$m_1v_{1x}+m_2v_{2x}=m_3v_{3x}.$$

Так как состав был неподвижным, векторы скорости $\vec{v}_1$ тепловоза до сцепления и скорости $\vec{v}_3$ тепловоза вместе с составом после сцепления параллельны и проекции векторов v_{1x} и v_{3x} можно заменить их модулями:

$$m_1v_1+m_2v_2=m_3v_3,$$

отсюда скорость v_3 тепловоза и состава после сцепления равна

$$v_3=\frac{m_1v_1+m_2v_2}{m_3}, \qquad v_3=\frac{1{,}3\cdot 10^5\ кг\cdot 2\ м/с+0\ кг\cdot м/с}{1{,}3\cdot 10^6\ кг}=0{,}2\ м/с.$$

7. Человек массой 70 кг спускается по лестнице длиной 20 м, расположенной под углом 30° к горизонтальной плоскости. Найдите работу силы тяжести.

Решение

$m = 70$ кг
$s = 20$ м
$\alpha = 30°$

A — ?

Работа силы тяжести равна произведению модуля вектора силы $\vec{F}$ на модуль вектора перемещения $\vec{s}$ и косинус угла α между вектором $\vec{F}$ силы и вектором $\vec{s}$ перемещения:

$$A = Fs\cos\alpha = mg\,s\cos\alpha.$$

Угол α равен 60°, поэтому работа равна

$$A = 70\ \text{кг}\cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2\cdot 20\ \text{м}\cdot 0{,}5 \approx 6860\ \text{Дж} \approx 7\ \text{кДж}.$$

8. Вычислите работу силы упругости при изменении деформации пружины жесткостью 200 Н/м от $x_1 = 2$ см до $x_2 = 6$ см.

Решение

$k = 200$ Н/м
$x_1 = 2\cdot 10^{-2}$ м
$x_2 = 6\cdot 10^{-2}$ м

A — ?

По закону Гука проекция вектора силы упругости на ось OX, направленную по вектору перемещения конца пружины при ее деформации, равна

$$(F_y)_x = -kx.$$

Так как сила упругости изменяется пропорционально деформации, то для вычисления работы можно найти среднее значение ее проекции при изменении деформации пружины от 2 см до 6 см:

$$(F_y)_{x\,\text{ср}} = \frac{(F_y)_{x_1} + (F_y)_{x_2}}{2} = \frac{-kx_1 - kx_2}{2};$$

$$(F_y)_{x\,\text{ср}} = \frac{-200\ \text{Н/м}\cdot 2\cdot 10^{-2}\ \text{м} - 200\ \text{Н/м}\cdot 6\cdot 10^{-2}\ \text{м}}{2} = -8\ \text{Н}.$$

Работа силы упругости равна произведению модуля среднего значения силы на модуль перемещения и косинус угла между этими векторами:

$$A = F_{y\ \text{ср}}(x_2 - x_1)\cos\alpha.$$

При растяжении пружины вектор силы упругости направлен противоположно вектору перемещения, поэтому угол α между ними равен 180°, а $\cos\alpha = -1$. Тогда работа силы упругости будет равна

$$A = 8\ \text{Н}\cdot 4\cdot 10^{-2}\ \text{м}\,(-1) = -0{,}32\ \text{Дж}.$$

Работа силы упругости может быть найдена и по изменению потенциальной энергии пружины:

$$A=-(E_{p2}-E_{p1})=-\left(\frac{kx_2^2}{2}-\frac{kx_1^2}{2}\right);$$

$$A=-\left(\frac{200\ \text{Н/м}\cdot 36\cdot 10^{-4}\ \text{м}^2}{2}-\frac{200\ \text{Н/м}\cdot 4\cdot 10^{-4}\ \text{м}^2}{2}\right)=-0{,}32\ \text{Дж}.$$

9. Кран поднимает груз массой 2 т на высоту 24 м за 2 мин. Найдите механическую мощность. Силами трения пренебречь.

Решение

$m=2$ т $=2000$ кг
$h=24$ м
$t=2$ мин $=120$ с

N — ?

Механическая мощность равна

$$N=\frac{A}{t}.$$

Механическая работа A внешних сил при подъеме груза равна изменению его потенциальной энергии:

$$A=E_{p2}-E_{p1}=mgh-0=mgh.$$

Поэтому механическая мощность равна

$$N=\frac{mgh}{t};$$

$$N=\frac{2000\ \text{кг}\cdot 10\ \text{м/с}^2\cdot 24\ \text{м}}{120\ \text{с}}=4\cdot 10^3\ \text{Вт}=4\ \text{кВт}.$$

10. Самолет Ил-62 имеет четыре двигателя, сила тяги каждого 103 кН. Какова полезная мощность двигателей при полете самолета со скоростью 864 км/ч?

Решение

$v=864$ км/ч $=240$ м/с
$F=103$ кН $=1{,}03\cdot 10^5$ Н

N — ?

Полезная мощность N двигателей равна отношению механической работы A ко времени t:

$$N=\frac{A}{t}.$$

Механическая работа при совпадении направлений вектора силы $\vec{F}$ и перемещения $\vec{s}$ равна

$$A=Fs.$$

Отсюда для механической мощности имеем

$$N=\frac{A}{t}=\frac{Fs}{t}.$$

Так как при равиомерном прямолинейном движении

$$v=\frac{s}{t}, \text{ то } N=Fv;$$

$$N=240 \text{ м/с}\cdot 1{,}03\cdot 10^5 \text{ Н}\approx 2{,}5\cdot 10^7 \text{ Вт}=25\,000 \text{ кВт}.$$

11. На высоте 2,2 м от поверхности Земли мяч имел скорость 10 м/с. С какой скоростью будет двигаться мяч у поверхности Земли? Сопротивлением воздуха пренебречь, ускорение свободного падения принять равным 10 м/с^2.

Решение

$h_1=2{,}2$ м
$h_2=0$ м
$v_1=10$ м/с
$g=10$ м/с^2

---

v_2 — ?

Хотя в условии задачи не указаны направление вектора скорости мяча и масса мяча, задача имеет однозначное решение.

Так как на мяч действует только сила тяготения со стороны Земли, к замкнутой системе «Земля — мяч» применим закон сохранения механической энергии.

Согласно этому закону полная механическая энергия системы «Земля — мяч» остается неизменной, а изменение кинетической энергии мяча равно изменению его потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:

$$E_{k2}-E_{k1}=-(E_{p2}-E_{p1}).$$

Обозначим массу мяча m, получим

$$\frac{mv_2^2}{2}-\frac{mv_1^2}{2}=-(mgh_2-mgh_1).$$

Разделим обе части равенства на m и умножим на 2:

$$v_2^2-v_1^2=2g(h_1-h_2).$$

Отсюда скорость v_2 мяча у поверхности Земли равна

$$v_2=\sqrt{2g\,(h_1-h_2)+v_1^2};$$

$$v_2=\sqrt{2\cdot 10 \text{ м/с}^2\cdot 2{,}2 \text{ м}+100 \text{ м}^2/\text{с}^2}=\sqrt{144 \text{ м}^2/\text{с}^2}=12 \text{ м/с}.$$

12. Крупнейшая в мире Саяно-Шушенская гидроэлектростанция будет вырабатывать 23,5 млрд. кВт·ч электроэнергии в год. Сколько воды должно проходить за год через гидротурбины станции? Высота плотины — 222 м. Считать, что потенциальная энергия воды полностью превращается в электрическую энергию.

Решение

$E = 2{,}35 \cdot 10^{10}$ кВт·ч $=$
$= 8{,}46 \cdot 10^{16}$ Дж
$\rho = 10^3$ кг/м^3
$h_1 = 222$ м
$h_2 = 0$ м

V — ?

По закону сохранения энергии электроэнергия, вырабатываемая гидроэлектростанцией, получается за счет превращения кинетической энергии движущейся воды в энергию электрического тока. Кинетическая энергия воды в свою очередь получается в результате превращения потенциальной энергии воды у вершины плотины в кинетическую у основания плотины. Если не учитывать потери, то вся выработанная гидроэлектростанцией электроэнергия E равна изменению потенциальной энергии ΔE_p воды, прошедшей через гидроагрегаты станции, взятому с противоположным знаком:

$$E = -\Delta E_p = -(mgh_2 - mgh_1) = mg(h_1 - h_2). \qquad (1)$$

Массу m воды выразим через ее объем V и плотность ρ:

$$m = \rho V. \qquad (2)$$

Из равенств (1) и (2) найдем выражение для объема воды, прошедшей через гидроагрегаты станции:

$$V = \frac{E}{\rho g(h_1 - h_2)};$$

$$V = \frac{8{,}46 \cdot 10^{16} \text{ Дж}}{10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 222 \text{ м}} \approx 3{,}8 \cdot 10^{10} \text{ м}^3 = 38 \text{ км}^3.$$

13. Определите минимальное значение тормозного пути автомобиля, начавшего торможение на горизонтальном участке шоссе при скорости движения 20 м/с. Коэффициент трения равен 0,5.

Решение

$v_0 = 20$ м/с
$\mu = 0{,}5$
$v_1 = 0$ м/с

s_{min} — ?

Тормозной путь автомобиля будет иметь минимальное значение при максимальном значении силы трения. Модуль максимального значения силы трения равен

$$(F_{тр})_{max} = \mu mg.$$

Вектор силы трения $\vec{F}_{тр}$ при торможении направлен противоположно векторам скорости $\vec{v}_0$ и перемещения $\vec{s}$.

При прямолинейном равноускоренном движении проекция перемещения s_x автомобиля на ось, параллельную вектору скорости $\vec{v}_0$ автомобиля, равна

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

Переходя к модулям величин, получаем уравнение

$$s = v_0 t - \frac{at^2}{2}.$$

Значение времени t можно найти из условия

$$v_{1x} = v_{0x} + a_x t = 0 \text{ или } v_1 = v_0 - at = 0,$$

$$t = \frac{v_0}{a}.$$

Тогда для модуля перемещения s получаем

$$s = \frac{v_0 v_0}{a} - \frac{a v_0^2}{2a^2} = \frac{v_0^2}{2a}.$$

(Модуль перемещения $\vec{s}$ можно найти и с помощью выражения 2.10.)

Так как

$$a = \frac{(F_{тр})_{max}}{m} = \frac{\mu mg}{m} = \mu g,$$

то

$$s_{min} = \frac{v_0^2}{2\mu g}; \; s_{min} \approx \frac{400 \text{ м}^2/\text{с}^2}{2 \cdot 0{,}5 \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 40 \text{ м}.$$

Тот же результат можно получить на основе использования теоремы о кинетической энергии:

$$A = \triangle E_k, \; (F_{тр})_{max} s_{min} \cos\alpha =$$

$$= E_{k2} - E_{k1} = 0 - \frac{mv_0^2}{2} = -\frac{mv_0^2}{2}.$$

Так как вектор силы трения направлен противоположно вектору перемещения, угол α равен 180°, $\cos\alpha = -1$. Поэтому

$$-\mu mg \, s_{min} = -\frac{mv_0^2}{2};$$

$$s_{min} = \frac{v_0^2}{2\mu g}.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

14. Парашютист раскрыл свой парашют на высоте 1 км от поверхности Земли и далее двигался равномерно и прямолинейно со скоростью 7 м/с по вертикали вниз. На каком расстоянии от поверхности Земли он находился через 1 мин после раскрывания парашюта?

3 Заказ 937

15. На прямолинейном участке шоссе автомобиль увеличивает свою скорость от 18 км/ч до 72 км/ч за 20 с. С каким ускорением двигался автомобиль, если движение было равноускоренным?

16. Автомобиль двигался со скоростью 54 км/ч. Какой будет скорость автомобиля через 4 с после начала торможения, если при торможении ускорение постоянно и равно по модулю 3 м/с^2? Какой путь пройдет автомобиль за это время?

17. Какую скорость приобретает после прохождения пути 200 м электропоезд, начинающий равноускоренное прямолинейное движение с ускорением 1 м/с^2?

18. С горы начинают скатываться сани с ускорением 0,5 м/с^2. Какой путь проходят сани, если скорость их в конце горы 36 км/ч?

19. Какой длины должна быть взлетная полоса аэродрома для самолета ИЛ-62, если для взлета самолету необходимо иметь скорость 300 км/ч, а его двигатели могут обеспечить движение по взлетной полосе с ускорением 1,6 м/с^2?

20. Шарик, скатываясь с наклонной плоскости, за первую секунду прошел путь, равный 10 см. Чему равен путь, пройденный шариком за четвертую секунду?

21. Тормоз грузового автомобиля считается исправным, если при движении по сухой и ровной дороге со скоростью 36 км/ч тормозной путь не превышает 12,5 м. Определите ускорение при таком торможении.

22. Пуля, летящая со скоростью 600 м/с, пробивает доску толщиной 0,1 м и вылетает из нее со скоростью 400 м/с. Чему равен модуль ускорения пули в доске?

23. С каким минимальным ускорением должен двигаться автомобиль для экстренной остановки перед перекрестком, если его скорость в начале торможения 72 км/ч, а расстояние от перекрестка 50 м?

24. Космонавт проходит тренировку на центрифуге радиусом 15 м. С какой скоростью движется космонавт, если его центростремительное ускорение равно 40 м/с^2?

25. Лодка движется равномерно поперек течения реки; ее скорость относительно берега 2 м/с, скорость течения реки 3 м/с. С какой скоростью движется лодка относительно воды?

26. Человек переплывает реку шириной 100 м по прямой, перпендикулярной ее берегам. Скорость пловца относительно берега 0,3 м/с, скорость течения 0,4 м/с. Какое расстояние преодолевает пловец относительно воды?

27. Сила 10 Н сообщает телу ускорение 3 м/с^2. Какая сила сообщает этому телу ускорение 1,5 м/с^2?

28. Тело массой 5 кг под действием некоторой силы приобретает ускорение 1 м/с^2. Какое ускорение сообщит эта сила телу массой 10 кг?

29. На каком расстоянии от поверхности Земли сила гравитационного притяжения, действующая на тело, в 2 раза меньше, чем у поверхности Земли?

30. Масса орбитальной космической станции 19 т, масса космонавта в скафандре 100 кг. Оцените силу гравитационного взаимодействия между станцией и космонавтом на расстоянии 100 м. За какое приблизительно время под действием этой силы космонавт приблизится к станции на расстояние 1 м, если в начальный момент времени относительная скорость станции и космонавта была равна нулю?

31. Определите первую космическую скорость для Венеры. Масса Венеры $4{,}87 \cdot 10^{24}$ кг, радиус $6{,}05 \cdot 10^{6}$ м.

32. Спутник планеты Марс Фобос обращается по орбите радиусом $9{,}4 \cdot 10^{6}$ м с периодом 7 ч 39 мин. Определите массу планеты Марс.

33. Каким должен быть радиус круговой орбиты искусственного спутника Земли, для того чтобы он все время находился над одной точкой земной поверхности на экваторе?

34. Автомобиль «Москвич-412» массой 10^{3} кг движется со скоростью 36 км/ч по выпуклому мосту. Траектория движения автомобиля является дугой окружности радиусом 50 м. Определите вес автомобиля в верхней точке моста.

35. Какие «перегрузки» испытывает белье в центрифуге стиральной машины диаметром 0,3 м при частоте вращения 3000 об/мин?

36. При какой продолжительности суток на Земле вес тела на экваторе был бы равен нулю? Радиус Земли $6{,}4 \cdot 10^{6}$ м.

37. После скатывания с горы сани начинают движение по горизонтальной поверхности со скоростью 10 м/с. Коэффициент трения между полозьями саней и дорогой равен 0,1. Какой путь пройдут сани за 5 с и за 15 с?

38. Определите минимальный тормозной путь автомобиля на горизонтальном участке шоссе при начальной скорости 36 км/ч, если максимальное значение коэффициента трения покоя шин на шоссе 0,55.

39. Определите максимальное значение скорости автомобиля при движении на повороте по дуге окружности радиусом 50 м, если максимальное значение коэффициента трения покоя шин на шоссе равно 0,4.

40. Автомобиль массой 2000 кг стоит на участке шоссе с наклоном 10° к горизонтальной поверхности. Максимальное значение коэффициента трения покоя 0,5. Определите силу трения покоя, действующую на автомобиль.

41. Во сколько раз нужно увеличить силу тяги двигателей самолета для увеличения скорости его движения в два раза, если сила сопротивления при движении в воздухе возрастает пропорционально квадрату скорости?

42. Железнодорожный вагон массой 15 т движется по горизонтальному участку железнодорожного пути со скоростью 1 м/с. Его догоняет второй вагон массой 20 т, движущийся со скоростью 2 м/с. Какой будет скорость вагонов после их сцепления?

43. С какой примерно скоростью будет двигаться ракета массой 20 кг после вылета из нее продуктов сгорания топлива массой 1 кг со скоростью 2 км/с?

44. Определите силу тяги ракетного двигателя с расходом топлива 2000 кг/с при скорости истечения газов 3,5 км/с.

45. Какую работу совершает равнодействующая всех сил при разгоне автомобиля массой 5 т из состояния покоя до скорости 36 км/ч на горизонтальном участке пути?

46. Сани движутся равномерно и прямолинейно по горизонтальному участку дороги. Какую работу совершает сила 50 Н, приложенная к веревке, при перемещении саней на 100 м, если веревка тянется под углом 30° к горизонтальной плоскости?

47. Человек массой 70 кг поднимается по лестнице длиной 20 м на высоту 10 м. Какую работу совершает при этом сила тяжести?

48. Спортсмен массой 60 кг прыгает с высоты 9 м на упругую сетку — батут. Найдите максимальное значение потенциальной энергии упругой деформации сетки, если ее максимальный прогиб равен 1 м.

49. Стальной трос жесткостью 5·10 Н/м растянут на 2 мм. Вычислите потенциальную энергию упругой деформации троса.

50. Камень массой 1 кг брошен со скоростью 20 м/с под углом 25° к горизонту. С какой скоростью будет двигаться камень в тот момент, когда расстояние от него до поверхности Земли увеличится на 1 м по сравнению с начальным значением?

51. Высота плотины Красноярской ГЭС 120 м, мощность станции 6000 МВт. Сколько кубометров воды должно проходить через гидротурбины станции при КПД, равном 90%?

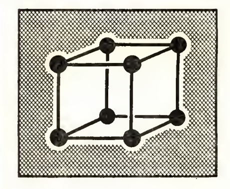
52. Найдите полезную работу, совершенную энергетической машиной с КПД 0,7 при затратах энергии $2 \cdot 10^6$ Дж.

53. Груз массой 1 кг на тонкой нити длиной 1 м совершает свободные колебания, максимальный угол отклонения нити от вертикального положения 5°. Определите силу упругости нити при прохождении грузом положения равновесия.

54. Гимнаст совершает большие обороты на перекладине. Во сколько раз его вес при прохождении нижнего вертикального положения больше веса в состоянии покоя? Скорость движения гимнаста в верхнем вертикальном положении считать равной нулю.

55. Для определения скорости пули массой m производится выстрел в ящик с песком массой M, подвешенный на тросе длиной l. Пуля застревает в песке, и ее удар приводит ящик в движение. При максимальном удалении ящика от положения равновесия трос отклоняется от вертикального положения на угол α. Выведите формулу для вычисления скорости пули по известным значениям l, α, M и m.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА



22. Основные положения молекулярно-кинетической теории и их опытное обоснование	70
23. Масса молекул	73
24. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа	74
25. Температура — мера средней кинетической энергии молекул	75
26. Уравнение состояния идеального газа	79
27. Свойства жидкостей	83
28. Испарение и конденсация	85
29. Кристаллические и аморфные тела	88
30. Механические свойства твердых тел	90
31. Первый закон термодинамики	94
32. Количество теплоты	96
33. Работа при изменении объема газа	98
34. Принципы действия тепловых двигателей	101
35. Тепловые машины	107
Примеры решения задач	116
Задачи для самостоятельного решения	125

22. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ И ИХ ОПЫТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ

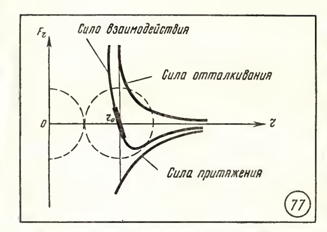
Развнтие представлений о строении вещества. Предположенне о том, что любое вещество состоит из мельчайших неделимых частиц — атомов, было высказано около 2500 лет назад древиегреческими философами Левкиппом н Демокритом. По нх представлеииям все тела образуются в результате соеднения атомов. Различия в свойствах тел объясияются тем, что тела состоят из различных атомов или одииаковые атомы по-разному соедииены между собой в простраистве.

Работы М. В. Ломоносова. Существеиный вклад в развитие молекулярно-кинетических представленнй сделал в середиие XVIII в. великий русский ученый Мнхаил Васильевич Ломоиосов (1711—1765). Он объяснил осиовные свойства газа, предположив, что все молекулы газа движутся беспорядочно, хаотичио и при столкновеннях отталкнваются друг от друга. Беспорядочиым движением молекул М. В. Ломоиосов впервые объяснил природу теплоты. Так как скорости теплового движеиия молекул могут быть сколько угодио велики, температура вещества по его представлеииям ие имеет ограинчения сверху. При уменьшеиии скорости молекул до иуля должно быть достигиуто мииимальное возможиое значеиие температуры вещества. Объясиение природы теплоты двнжением молекул и вывод о существоваиии абсолютного нуля температуры, сделанный М. В. Ломоиосовым, получили теоретнческое и экспернментальиое подтверждение в коице XIX в.

Основные положення молекулярно-кннетической теорин. *Молекулярно-кинетической теорией* иазывается учение о строеиии и свойствах вещества, использующее представления о существованни атомов и молекул как наимеиьших частиц химического вещества.

Способиость газов иеограиичению расширяться, упругость газов, жидкостей и твердых тел, способность к взаимиому проннкновеиию тел путем днффузии можно объяснить, если прннять следующие положения молекулярно-кннетической теории строеиия вещества: вещество состоит из частиц — атомов и молекул; эти частицы хаотически движутся; частицы взаимодействуют друг с другом.

Движеиие атомов и молекул, нх взаимодействия подчиияются закоиам механики. Это позволяет использовать закоиы механики для выяснеиия свойств тел, состоящих из большого числа хаотически движущихся малых частиц.

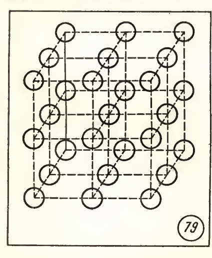




Взаимодействие атомов и молекул. При сближении двух атомов или молекул сначала преобладают силы притяжения. Но на некотором расстоянии r_0 между их центрами силы отталкивания возрастают настолько, что становятся равными по модулю силам притяжения. При дальнейшем сближении силы отталкивания превосходят силы притяжения (рис. 77). Силы притяжения между атомами и молекулами препятствуют растяжению твердого тела, силы отталкивания препятствуют его сжатию.

Действие сил молекулярного притяжения обнаруживается в опыте со свинцовыми цилиндрами, слипающимися после очистки их поверхностей (рис. 78).

Тепловое движение молекул. Молекулы и атомы в твердом теле совершают беспорядочные колебания относительно положений, в которых силы притяжения и отталкивания со стороны соседних атомов уравновешены (рис. 79).



В жидкости молекулы не только колеблются около положения равновесия, но и совершают перескоки из одного положения равновесия в соседнее, эти перескоки молекул являются причиной текучести жидкости, ее способности принимать форму сосуда.

В газах обычно расстояния между атомами и молекулами в среднем значительно больше размеров молекул. Силы отталкивания на больших расстояниях не действуют, поэтому газы легко сжимаются.

Практически отсутствуют между молекулами газа и силы притяжения, поэтому газы обладают свойством неограниченно расширяться.

Закономерности броуновского движения. Большое значение в обосновании молекулярно-кинетической теории имело открытие английского ботаника Роберта Броуна (1773—1858). В 1827 г. он обнаружил беспорядочное движение видимых в микроскоп твердых частиц, находящихся в жидкости. Это явление, названное броуновским движением, смогла объяснить лишь молекулярно-кинетическая теория на основе использования представлений о существовании молекул. Беспорядочно движущиеся молекулы жидкости или газа сталкиваются с твердой частицей и изменяют направление и модуль скорости ее движения. Число молекул, ударяющих частицу с различных сторон, и направление передаваемого ими импульса непостоянны. Чем меньше размеры и масса частицы, тем более заметными становятся изменения ее импульса во времени.

Французский ученый Жан Перрен (1870 — 1942) в 1908—1911 гг. выполнил серию экспериментов по изучению броуновского движения. Пример результатов одного из наблюдений за движением броуновской частицы представлен на рисунке 80. Закономерности броуновского движения, предсказанные на основе молекулярно-кинетической теории, полностью подтвердились этими экспериментами.

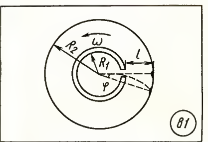
Измерение скорости молекул. Одним из первых экспериментов, в котором были непосредственно измерены скорости движения отдельных молекул газа, был опыт, выполненный немецким физиком Отто Штерном (1888—1969) в 1920 г.

В опыте использовался прибор, состоящий из двух цилиндров с общей осью вращения. По оси цилиндра была расположена платиновая проволока, покрытая серебром. Воздух из пространства между цилиндрами откачивался.

При пропускании электрического тока через проволоку в результате ее нагревания происходило испарение атомов серебра с поверхности проволоки. Во внутреннем цилиндре имелась щель, атомы серебра пролетали через нее и оседали на внутренней стенке второго цилиндра, образуя на ней заметную полоску.

Когда цилиндры приводились во вращение с одинаковой частотой, полоска оказывалась в другом месте. По углу φ между этими двумя положениями полоски (рис. 81), расстоянию $l=R_2-R_1$ и частоте ν вращения цилиндров можно было определить скорость атомов серебра:

$$v=\frac{l}{\Delta t}=\frac{2\pi\nu l}{\varphi}.$$



Полоска серебра, получившаяся при вращении цилиндров, оказалась размытой. Это свидетельствовало о том, что атомы серебра, испаряющиеся с проволоки, имеют различные скорости. Найденные из таких измерений значения скорости движения атомов серебра оказались совпадающими со значениями, полученными на основе молекулярно-кинетической теории. Это совпадение является одним из важнейших прямых доказательств справедливости молекулярно-кинетической теории газов.

Наблюдения отдельных атомов. В настоящее время основные положения молекулярно-кинетической теории подтверждаются многочисленными опытами с использованием достижений современной экспериментальной техники. С помощью ионного проектора получают изображения кристаллов, по которым можно представить их строение. Электронные микроскопы позволили получить изображения, по которым оказалось возможным определение расстояния между отдельными атомами в молекуле.

23. МАССА МОЛЕКУЛ

Количество вещества. Любое вещество состоит из частиц, поэтому количество вещества принято считать пропорциональным числу частиц. Единица количества вещества называется *молем* (моль).

Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же частиц, сколько содержится атомов в 0,012 кг углерода ^{12}C.

Отношение числа молекул N вещества к количеству вещества ν называется *постоянной Авогадро* N_A:

$$N_A = \frac{N}{\nu}. \qquad (23.1)$$

Постоянная Авогадро равна $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$, она показывает, сколько атомов или молекул содержится в одном моле вещества.

Количество вещества ν можно найти как отношение числа N атомов или молекул вещества к постоянной Авогадро N_A:

$$\nu = \frac{N}{N_A}. \qquad (23.2)$$

Молярная масса. *Молярной массой M* называется величина, равная отношению массы вещества m к количеству вещества ν:

$$M = \frac{m}{\nu}. \qquad (23.3)$$

Молярная масса выражается в *килограммах на моль* (кг/моль).

Молярную массу вещества можно найти путем определения количества вещества при известной массе вещества. Подставив

уравнение (23.2) в уравнение (23.3), молярную массу M вещества можно выразить через массу молекулы m_0:

$$M=\frac{mN_A}{N}=m_0N_A. \quad (23.4)$$

Масса молекул. Для определения массы молекулы m_0 нужно разделить массу m вещества на число N молекул в нем:

$$m_0=\frac{m}{N}=\frac{m}{\nu N_A}=\frac{M}{N_A}. \quad (23.5)$$

Таким образом, чтобы найти массу молекулы вещества, нужно знать молярную массу вещества M и постоянную Авогадро N_A. Молярная масса вещества обычно определяется химическими методами, постоянная Авогадро с высокой степенью точности определена несколькими физическими методами.

Значительно более высокая точность определения масс атомов и молекул достигается при использовании масс-спектрометра. Масс-спектрометр — это прибор, в котором с помощью электрических и магнитных полей происходит разделение пучков заряженных частиц (ионов) в пространстве в зависимости от их массы и заряда.

24. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Идеальный газ. Для объяснения свойств вещества в газообразном состоянии используется модель идеального газа. В модели идеального газа предполагается следующее: молекулы обладают пренебрежимо малым объемом по сравнению с объемом сосуда, между молекулами не действуют силы притяжения, при соударениях молекул друг с другом и со стенками сосуда действуют силы отталкивания.

Давление идеального газа. Одним из первых и важных успехов молекулярно-кинетической теории было качественное и количественное объяснение явления давления газа на стенки сосуда.

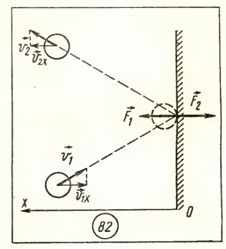
Качественное объяснение давления газа заключается в том, что молекулы идеального газа при столкновениях со стенками сосуда взаимодействуют с ними по законам механики как упругие тела. При столкновении молекулы со стенкой сосуда проекция v_x вектора скорости на ось OX, перпендикулярную стенке, изменяет свой знак на противоположный, но остается постоянной по модулю (рис. 82). Поэтому в результате столкновения молекулы со стенкой проекция ее импульса на ось OX изменяется от $mv_{1x}=-mv_x$ до $mv_{2x}=mv_x$.

Изменение импульса молекулы показывает, что на нее при столкновении действует сила $\vec{F}_1$, направленная от стенки. Изменение импульса молекулы равно импульсу силы $\vec{F}_1$:

$$F_1t=mv_{2x}-mv_{1x}=$$
$$=mv_x-(-mv_x)=2mv_x.$$

Во время столкновения молекула действует на стенку с силой $\vec{F}_2$, равной по третьему за-





кону Ньютона силе $\vec{F}_1$ по модулю и направленной противоположно.

Молекул газа очень много, и удары их о стенку следуют один за другим с очень большой частотой. Среднее значение геометрической суммы сил, действующих со стороны отдельных молекул при их столкновениях со стенкой сосуда, и является силой давления газа. Давление газа равно отношению модуля силы давления $\vec{F}$ к площади стенки S:

$$p=\frac{F}{S}.$$

На основе использования основных положений молекулярно-кинетической теории было получено уравнение, которое позволяло вычислить давление газа, если известны масса m_0 молекулы газа, среднее значение квадрата скорости молекул $\overline{v^2}$ и концентрация n молекул:

$$p=\frac{1}{3}nm_0\overline{v^2}. \qquad (24.1)$$

Уравнение (24.1) называют *основным уравнением молекулярно-кинетической теории.*

Обозначив среднее значение кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа $\overline{E}$:

$$\overline{E}=\frac{m_0\overline{v^2}}{2},$$

получим

$$p=\frac{2}{3}n\overline{E}. \qquad (24.2)$$

Давление идеального газа равно двум третям средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема.

25. ТЕМПЕРАТУРА — МЕРА СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛ

Температура. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории для идеального газа устанавливает связь легко измеряемого макроскопического параметра — давления — с такими микроскопическими параметрами газа, как средняя кинетическая энергия и концентрация молекул. Но, измерив только давление газа, мы не можем узнать ни среднее значение кинетической энергии молекул в отдельности, ни их концентрацию. Следовательно, для нахождения микроскопических параметров газа нужны измерения еще какой-то физической величины, связанной со

средней кинетической энергией молекул. Такой величиной в физике является *температура*.

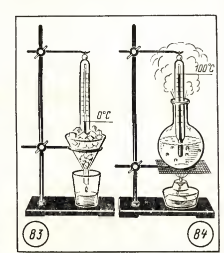
Из повседневного опыта каждый знает, что бывают тела горячие и холодные. При контакте двух тел, из которых одно мы воспринимаем как горячее, а другое — как холодное, происходят изменения физических параметров как первого, так и второго тела. Например, твердые и жидкие тела обычно при нагревании расширяются. Через некоторое время после установления контакта между телами изменения макроскопических параметров тел прекращаются. Такое состояние тел называется *тепловым равновесием*. Физический параметр, одинаковый во всех частях системы тел, находящихся в состоянии теплового равновесия, называется *температурой* тела. Если при контакте двух тел никакие их физические параметры, например объем, давление, не изменяются, то между телами нет теплопередачи и температура тел одинакова.

Термометры. В повседневной практике наиболее распространен способ измерения температуры с помощью жидкостного термометра.

В устройстве жидкостного термометра используется свойство расширения жидкостей при нагревании. В качестве рабочего тела обычно применяется ртуть, спирт, глицерин. Чтобы измерить температуру тела, термометр приводят в контакт с этим телом; между телом и термометром будет осуществляться теплопередача до установления теплового равновесия. Масса термометра должна быть значительно меньше массы тела, так как в противном случае процесс измерения может существенно изменить температуру тела.

Изменения объема жидкости в термометре прекращаются, когда между телом и термометром прекращается теплообмен. При этом температура жидкости в термометре равна температуре тела.

Отметив на трубке термометра положение конца столба жидкости при помещении термометра в тающий лед, а затем в кипящую воду при нормальном давлении и разделив отрезок между этими отметками на 100 равных частей, получают температурную шкалу по Цельсию. Температура тающего льда принимается равной 0 °C (рис. 83), кипящей воды — 100 °C (рис. 84). Изменение длины столба жидкости в термометре на одну сотую длины между отметками 0 и 100 °C соответствует изменению температуры на 1 °C.



Существенным недостатком способа измерения температуры с помощью жидкостных термометров является то, что шкала температуры при этом оказывается связанной с конкретными физическими свойствами определенного вещества, используемого в качестве рабочего тела в термометре,— ртути, глицерина, спирта. Изменение объема различных жидкостей при одинаковом нагревании оказывается несколько различным. Поэтому ртутный и глицериновый термометры, показания которых совпадают при 0 и 100 °С, дают разные показания при других температурах.

Газы в состоянии теплового равновесия. Для того чтобы найти более совершенный способ определения температуры, нужно найти такую величину, которая была бы одинаковой для любых тел, находящихся в состоянии теплового равновесия.

Экспериментальные исследования свойств газов показали, что для любых газов, находящихся в состоянии теплового равновесия, отношение произведения давления газа на его объем к числу молекул оказывается одинаковым:

$$\frac{p_1V_1}{N_1}=\frac{p_2V_2}{N_2}=\frac{p_3V_3}{N_3}=\theta. \quad (25.1)$$

Этот опытный факт позволяет принять величину θ в качестве естественной меры температуры.

Так как $n=\frac{N}{V}$, то с учетом основного уравнения молекулярно-кинетической теории (24.2) получим

$$\frac{pV}{N}=\frac{2}{3}\bar{E}=\theta. \quad (25.2)$$

Следовательно, средняя кинетическая энергия молекул любых газов, находящихся в тепловом равновесии, одинакова. Величина θ равна двум третям средней кинетической энергии беспорядочного теплового движения молекул газа и выражается в джоулях.

В физике обычно выражают температуру в *градусах*, принимая, что температура T в градусах и величина θ связаны уравнением

$$\theta=kT, \quad (25.3)$$

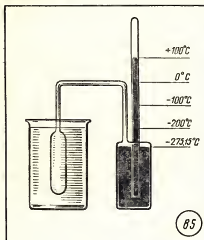
где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единицы температуры.

Отсюда получаем

$$\frac{pV}{N}=kT. \quad (25.4)$$

Последнее уравнение показывает, что имеется возможность выбрать температурную шкалу, не зависящую от природы газа, используемого в качестве рабочего тела.

Практически измерение температуры на основании использования уравнения (25.4) осуществляется с помощью газового термометра (рис. 85). Устройство его таково: в сосуде постоянного объема находится газ, количество газа остается неизменным. При постоянных значениях объема V и числа молекул N давление газа, измеряемое манометром, может служить мерой температуры газа, а значит, и любого тела, с которым газ находится в тепловом равновесии.



Абсолютная шкала температур. Шкала измерения температуры в соответствии с уравнением (25.4) называется *абсолютной шкалой.* Ее предложил английский физик У. Кельвин (Томсон) (1824—1907), поэтому шкалу называют также *шкалой Кельвина.*

До введения абсолютной шкалы температур в практике получила широкое распространение шкала измерения температуры по Цельсию. Поэтому единица температуры по абсолютной шкале, называемая *кельвином* (К), выбрана равной одному градусу по шкале Цельсия:

$$1\,\text{К} = 1\,°\text{C}. \qquad (25.5)$$

Абсолютный нуль температуры. В левой части уравнения (25.4) все величины могут иметь только положительные значения или быть равными нулю. Поэтому абсолютная температура T может быть только положительной или равной нулю. Температура, при которой давление идеального газа при постоянном объеме должно быть равно нулю, называется *абсолютным нулем температуры.*

Постоянная Больцмана. Значение постоянной k в уравнении (25.4) можно найти по известным значениям давления и объема газа с известным числом молекул N при двух значениях температуры T_0 и T_1:

$$\frac{p_0V_0}{N} = kT_0, \qquad \frac{p_1V_1}{N} = kT_1,$$

$$k = \frac{p_1V_1 - p_0V_0}{N(T_1 - T_0)}. \qquad (25.6)$$

Как известно, 1 моль любого газа содержит примерно $6{,}022 \cdot 10^{23}$ молекул и при нормальном давлении $p_0 = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па занимает объем $V_0 = 2{,}24 \cdot 10^{-2}$ м^3.

Опыты показали, что при нагревании любого газа при постоянном объеме от 0 до 100° C его давление возрастает от $1{,}013 \cdot 10^5$ до $1{,}38 \cdot 10^5$ Па. Подставляя эти значения в уравнение (25.6), получаем

$$k \approx \frac{1{,}38 \cdot 10^5\,\text{Па} \cdot 22{,}4 \cdot 10^{-3}\,\text{м}^{-3} - 1{,}013 \cdot 10^5\,\text{Па} \cdot 22{,}4 \cdot 10^{-3}\,\text{м}^3}{6 \cdot 10^{23} \cdot 100\,\text{К}} \approx$$

$$\approx \frac{3{,}7 \cdot 10^4\,\text{Па} \cdot 22{,}4 \cdot 10^{-3}\,\text{м}^3}{6 \cdot 10^{23} \cdot 100\,\text{К}} \approx 1{,}38 \cdot 10^{-23}\,\text{Дж/К};$$

$$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\,\text{Дж/К}.$$

Коэффициент k называется *постоянной Больцмана*, в честь австрийского физика Людвига Больцмана (1844—1906), одного из создателей молекулярно-кинетической теории.

Связь абсолютной шкалы и шкалы Цельсия. Уравнение (25.4) позволяет по известному значению объема V_0 одного моля газа при температуре 0 °С и нормальном давлении $1{,}013 \cdot 10^5$ Па и найденному значению постоянной Больцмана установить связь между значениями температуры t по шкале Цельсия и температуры T по абсолютной шкале. При температуре 0 °С температура T по абсолютной шкале равна

$$T = \frac{p_0 V_0}{N_A k},$$

$$T = \frac{1{,}013 \cdot 10^5 \ \text{Па} \cdot 22{,}4 \cdot 10^{-3} \ \text{м}^3}{6{,}022 \cdot 10^{23} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \ \text{Дж/К}} = 273 \ \text{К}.$$

Мы получили, что температура 0 °С по шкале Цельсия соответствует температуре 273 К по абсолютной шкале.

Так как единица температуры по абсолютной шкале 1 К выбрана равной единице температуры по шкале Цельсия 1 °С, то при любой температуре t по Цельсию значение абсолютной температуры T выше на 273 градуса:

$$T = t + 273. \qquad (25.7)$$

Из уравнения (25.7) следует, что абсолютный нуль соответствует −273 °С (более точно, −273,15 °С). Соответствие шкалы Цельсия и абсолютной шкалы температур представлено на рисунке 86.

Температура — мера средней кинетической энергии молекул. Из уравнений (25.2) и (25.4) следует равенство

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT. \qquad (25.8)$$

Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре.

Из уравнений (24.2) и (25.8) можно получить, что

$$p = nkT. \qquad (25.9)$$

Уравнение (25.9) показывает, что при одинаковых значениях температуры и концентрации молекул давление любых газов одинаково, независимо от того, из каких молекул они состоят.

26. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Используя зависимость давления идеального газа от его температуры и концентрации молекул

$$p = nkT,$$

можно найти связь между основными макроскопическими параметрами газа — объемом V, его давлением p и температурой T.

Концентрация n молекул газа равна

$$n=\frac{N}{V}, \qquad (26.1)$$

где N — число молекул газа в сосуде объемом V. Число N можно выразить как произведение количества вещества ν на постоянную Авогадро N_A:

$$N=\nu N_A. \qquad (26.2)$$

Из выражений (25.9), (26.1) и (26.2) получаем

$$p=\frac{\nu N_A}{V}kT. \qquad (26.3)$$

Произведение постоянной Авогадро N_A на постоянную Больцмана k называется *молярной газовой постоянной* R. Молярная газовая постоянная равна

$$R=6{,}022\cdot10^{23}\text{ моль}^{-1}\times 1{,}38\cdot10^{-23}\text{ Дж/К}\approx 8{,}31\text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}. \qquad (26.4)$$

Используя молярную газовую постоянную, выражение (26.3) преобразуем в уравнение

$$pV=\nu RT. \qquad (26.5)$$

Количество вещества ν можно найти, зная массу вещества m и его молярную массу M:

$$\nu=\frac{m}{M}, \qquad (26.6)$$

поэтому уравнение (26.5) можно записать в такой форме:

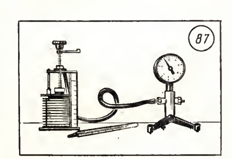
$$pV=\frac{m}{M}RT. \qquad (26.7)$$

Это уравнение называется *уравнением состояния идеального газа.*

Уравнение, устанавливающее связь между давлением, объемом и температурой газов, было получено французским физиком Бенуа Клапейроном (1799—1864). В форме (26.7) его впервые применил великий русский ученый Дмитрий Иванович Менделеев (1834—1907), поэтому уравнение состояния газа называется *уравнением Менделеева — Клапейрона.*

Для исследования связи между объемом, давлением и температурой газа можно использовать герметичный сосуд, объем которого может изменяться. Внешний вид такого прибора — сильфона — представлен на рисунке 87.

Изопроцессы в газах. Уравнение (26.7) показывает, что возможно одновременное изменение пяти параметров, характеризующих состояние идеального газа. Однако многие процессы в газах, происходящие в природе и осуществляемые в технике, можно рассматривать приближенно как процессы, в которых изменяются лишь два параметра из пяти. Особую роль в физике и технике играют три процесса — изотермический,



изохорный и изобарный. Рассмотрим эти процессы.

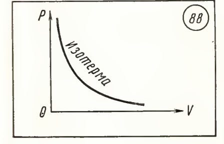
Изотермический процесс. Изотермическим процессом называется процесс, протекающий при постоянной температуре T. Из уравнения состояния идеального газа (26.7) следует, что при постоянной температуре T и неизменных значениях массы газа и его молярной массы M произведение давления p газа на его объем V должно оставаться постоянным:

$$pV = \text{const}. \qquad (26.8)$$

Изотермический процесс можно осуществить, например, путем изменения объема газа при постоянной температуре.

График изотермического процесса называется изотермой. Изотерма, изображенная в прямоугольной системе координат, по оси ординат которой отсчитывается давление газа, а по оси абсцисс — его объем, является гиперболой (рис. 88).

Уравнение (26.8), устанавливающее связь между давлением и объемом газа при постоянной температуре, было получено из эксперимента до создания молекулярно-кинетической теории газов в 1662 г. английским физиком Р о б е р т о м Б о й л е м (1627—1691) и в 1676 г. французским физиком Э д м о м М а р и о т т о м (1620—1684). Поэтому это уравнение называют *законом Бойля — Мариотта.*



Изохорный процесс. Изохорным процессом называется процесс, протекающий при неизменном объеме V и условии $m = \text{const}$ и $M = \text{const}$.

При этих условиях из уравнения состояния идеального газа (26.7) для двух значений температуры T_0 и T следует

$$p_0 V = \frac{m}{M} R T_0 \text{ и } pV = \frac{m}{M} RT,$$

или

$$\frac{p}{p_0} = \frac{T}{T_0}, \; p = p_0 \frac{T}{T_0}.$$

Если T_0 выбрать равным 273 К (0 °С), то $\frac{1}{T_0} = \frac{1}{273}$ К.

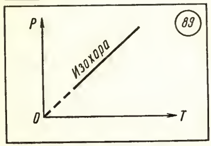
Обозначив $\frac{1}{T_0} = \frac{1}{273}\text{ К}^{-1} = \alpha$, получим уравнение для изохорного процесса

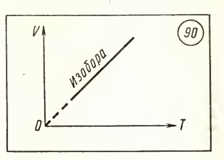
$$p = p_0 \alpha T, \qquad (26.9)$$

где p — давление газа при абсолютной температуре T, p_0 — давление газа при температуре 0 °С, α — температурный коэффициент давления газа, равный $\frac{1}{273}\text{ К}^{-1}$.

График уравнения изохорного процесса называется изохорой. Изохора, изображенная в прямоугольной системе координат, по оси ординат которой отсчи-







тывается давление газа, а по оси абсцисс — его абсолютная температура, является прямой, проходящей через начало координат (рис. 89).

Экспериментальным путем зависимость давления газа от температуры исследовал французский физик Жак Шарль (1746—1823) в 1787 г. Поэтому уравнение (26.9) называется *законом Шарля.*

Изохорный процесс можно осуществить, например, нагреванием воздуха при постоянном объеме.

Изобарный процесс. Изобарным процессом называется процесс, протекающий при неизменном давлении p и условии $m = \text{const}$ и $M = \text{const}$.

Таким же способом, как это было сделано для изохорного процесса, можно получить для изобарного процесса уравнение

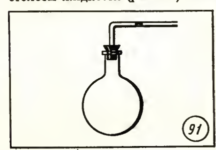
$$V = V_0 \alpha T, \qquad (26.10)$$

где V — объем газа при абсолютной температуре T, V_0 — объем газа при температуре 0 °С; коэффициент α, равный 1/273 $К^{-1}$, называется температурным коэффициентом объемного расширения газов.

График уравнения изобарного процесса называется изобарой. Изобара, изображенная в прямоугольной системе координат, по оси ординат которой отсчитывается объем газа, а по оси абсцисс — его абсолютная температура, является прямой, проходящей через начало координат (рис. 90).

Экспериментальное исследование зависимости объема газа от температуры провел в 1802 г. французский физик Жозеф Гей-Люссак (1778—1850). Поэтому уравнение (26.10) называется *законом Гей-Люссака.*

Изобарный процесс происходит, например, при нагревании или охлаждении воздуха в стеклянной колбе, соединенной со стеклянной трубкой, отверстие в которой закрыто небольшим столбом жидкости (рис. 91).



27. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Особенности жидкого состояния вещества. Молекулы вещества в жидком состоянии расположены вплотную друг к другу, как и в твердом состоянии. Поэтому объем жидкости мало зависит от давления. Постоянство занимаемого объема является свойством, общим для жидких и твердых тел и отличающим их от газов, способных занимать любой предоставленный им объем.

Возможность свободного перемещения молекул относительно друг друга обусловливает свойство текучести жидкости. Тело в жидком состоянии, как и в газообразном, не имеет постоянной формы. Форма жидкого тела определяется формой сосуда, в котором находится жидкость, действием внешних сил и сил поверхностного натяжения. Бо́льшая свобода движения молекул в жидкости приводит к большей скорости диффузии в жидкостях по сравнению с твердыми телами, обеспечивает возможность растворения твердых веществ в жидкостях.

Поверхностное натяжение. С силами притяжения между молекулами и подвижностью молекул в жидкостях связано проявление сил *поверхностного натяжения.*

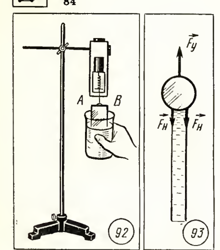
Внутри жидкости силы притяжения, действующие на одну молекулу со стороны соседних с ней молекул, взаимно компенсируются. Любая молекула, находящаяся у поверхности жидкости, притягивается молекулами, находящимися внутри жидкости. Под действием этих сил молекулы с поверхности жидкости уходят внутрь жидкости и число молекул, находящихся на поверхности, уменьшается до тех пор, пока свободная поверхность жидкости не достигнет минимального из возможных в данных условиях значения. Минимальную поверхность среди тел данного объема имеет шар, поэтому при отсутствии или пренебрежимо малом действии других сил жидкость под действием сил поверхностного натяжения принимает форму шара.

Свойство сокращения свободной поверхности жидкости во многих явлениях выглядит таким образом, будто жидкость покрыта тонкой растянутой упругой пленкой, стремящейся к сокращению.

Силой поверхностного натяжения называют силу, которая действует вдоль поверхности жидкости перпендикулярно к линии, ограничивающей эту поверхность, и стремится сократить ее до минимума.

Подвесим на крючок пружинного динамометра П-образную проволоку. Длина стороны AB равна l. Начальное растяжение пружины динамометра под действием силы тяжести проволоки можно исключить из рассмотрения установкой нулевого деления шкалы против указателя действующей силы.

Опустим проволоку в воду, затем будем медленно опускать вниз сосуд с водой (рис. 92). Опыт показывает, что при этом вдоль проволоки образуется плен-



ка жидкости и пружина динамометра растягивается. По показаниям динамометра можно определить силу поверхностного натяжения. При этом следует учесть, что пленка жидкости имеет две поверхности (рис. 93) и сила упругости $\vec{F}_у$ равна по модулю удвоенному значению силы поверхностного натяжения $\vec{F}_н$:

$$F_у = 2F_н.$$

Если взять проволоку со стороной AB, вдвое большей длины, то значение силы поверхностного натяжения оказывается вдвое бо́льшим. Опыты с проволоками разной длины показывают, что отношение модуля силы поверхностного натяжения, действующей на границу поверхностного слоя длиной l, к этой длине есть величина постоянная, не зависящая от длины l. Эту величину называют *коэффициентом поверхностного натяжения* и обозначают греческой буквой «сигма»:

$$\sigma = \frac{F_н}{l}. \qquad (27.1)$$

Коэффициент поверхностного натяжения выражается в *ньютонах на метр* (Н/м). Поверхностное натяжение различно у разных жидкостей.

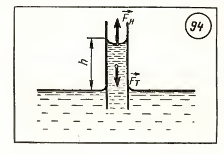
Если силы притяжения молекул жидкостей между собой меньше сил притяжения молекул жидкости к поверхности твердого тела, то жидкость смачивает поверхность твердого тела. Если же силы взаимодействия молекул жидкости и молекул твердого тела меньше сил взаимодействия между молекулами жидкости, то жидкость не смачивает поверхность твердого тела.

Капиллярные явления. Особенности взаимодействия жидкостей со смачиваемыми и несмачиваемыми поверхностями твердых тел являются причиной капиллярных явлений.

Капилляром называется трубка с малым внутренним диаметром. Возьмем капиллярную стеклянную трубку и погрузим один ее конец в воду. Опыт показывает, что внутри капиллярной трубки уровень воды оказывается выше уровня открытой поверхности воды.

При полном смачивании жидкостью поверхности твердого тела силу поверхностного натяжения можно считать направленной вдоль поверхности твердого тела перпендикулярно к границе соприкосновения твердого тела и жидкости. В этом случае подъем жидкости вдоль смачиваемой поверхности продолжается до тех пор, пока сила тяжести $\vec{F}_т$,





действующая на столб жидкости в капилляре и направленная вниз, не станет равной по модулю силе поверхностного натяжения $\vec{F}_н$, действующей вдоль границы соприкосновения жидкости с поверхностью капилляра (рис. 94):

$$F_т = F_н,$$

$$F_т = mg = \rho h \pi r^2 g,$$

$$F_н = \sigma l = \sigma 2\pi r.$$

Отсюда получаем, что высота подъема столба жидкости в капилляре обратно пропорциональна радиусу капилляра:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}. \qquad (27.2)$$

28. ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ

Испарение. Неравномерное распределение кинетической энергии теплового движения молекул приводит к тому, что при любой температуре кинетическая энергия некоторых молекул жидкости или твердого тела может превышать потенциальную энергию их связи с остальными молекулами. *Испарение* — это процесс, при котором с поверхности жидкости или твердого тела вылетают молекулы, кинетическая энергия которых превышает потенциальную энергию взаимодействия молекул. Испарение сопровождается охлаждением жидкости.

Насыщенный и ненасыщенный пар. Испарение жидкости в закрытом сосуде при неизменной температуре приводит к постепенному увеличению концентрации молекул испаряющегося вещества в газообразном состоянии. Через некоторое время после начала процесса испарения концентрация вещества в газообразном состоянии достигает такого значения, при котором число молекул, возвращающихся в жидкость в единицу времени, становится равным числу молекул, покидающих поверхность жидкости за то же время. Устанавливается динамическое равновесие между процессами испарения и конденсации вещества.

Вещество в газообразном состоянии, находящееся в динамическом равновесии с жидкостью, называется *насыщенным* паром. Пар, находящийся при давлении ниже давления насыщенного пара, называется *ненасыщенным*.

При сжатии насыщенного пара концентрация молекул пара увеличивается, равновесие между процессами испарения и конденсации нарушается и часть пара превращается в жидкость. При расширении насыщенного пара концентрация его молекул уменьшается и часть жидкости

превращается в пар. Таким образом, концентрация насыщенного пара остается постоянной независимо от объема. Так как давление газа пропорционально концентрации и температуре ($p = nkT$), давление насыщенного пара при постоянной температуре не зависит от объема.

Интенсивность процесса испарения увеличивается с возрастанием температуры жидкости. Поэтому динамическое равновесие между испарением и конденсацией при повышении температуры устанавливается при бо́льших концентрациях молекул газа.

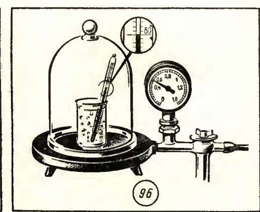
Давление идеального газа при постоянной концентрации молекул возрастает прямо пропорционально абсолютной температуре. Так как в насыщенном паре при возрастании температуры концентрация молекул увеличивается, давление насыщенного пара с повышением температуры возрастает быстрее, чем давление идеального газа с постоянной концентрацией молекул (рис. 95).

Кипение. Зависимость температуры кипения от давления. Процесс испарения может происходить не только с поверхности жидкости, но и внутри жидкости. Пузырьки пара внутри жидкости расширяются и всплывают на поверхность, если давление насыщенного пара равно внешнему давлению или превышает его. Этот процесс называется *кипением*.

При температуре 100 °С давление насыщенного водяного пара равно нормальному атмосферному давлению, поэтому при нормальном давлении кипение воды происходит при 100 °С. При температуре 80 °С давление насыщенного пара примерно в два раза меньше нормального атмосферного давления. Поэтому вода кипит при 80 °С, если давление над ней уменьшить до 0,5 нормального атмосферного давления (рис. 96).

При понижении внешнего давления температура кипения жидкости понижается, при повышении давления температура кипения повышается.



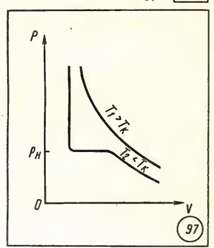


Критическая температура. Любое вещество, находящееся в газообразном состоянии, может превратиться в жидкость. Однако каждое вещество может испытать такое превращение лишь при температурах, меньших некоторого, особого для каждого вещества значения, называемого *критической температурой* $T_к$. При температурах, больших критической, вещество не превращается в жидкость ни при каких давлениях.

Модель идеального газа применима для описания свойств реально существующих в природе газов в ограниченном диапазоне температур и давлений. При понижении температуры ниже критической для данного газа действием сил притяжения между молекулами уже нельзя пренебрегать, и при достаточно высоком давлении молекулы вещества соединяются между собой.

Изотермы реального газа. Способность реального газа превращаться в жидкость приводит к тому, что его изотермы существенно отличаются от изотерм идеального газа (рис. 97).

Изотермическое сжатие реального газа при температуре T_2 ($T_2 < T_к$) происходит в соответствии с уравнением изотермы идеального газа лишь до давления, равного давлению насыщенного пара p_0 при данной температуре T_2. При дальнейшем уменьшении объема часть газа превращается в жидкость, а давление остается постоянным и равным давлению насыщенного пара.



Горизонтальный участок на изотерме реального газа обусловлен процессом превращения газа в жидкость.

Уменьшение объема при постоянном давлении может происходить до тех пор, пока весь газ в сосуде не превратится в жидкость. Дальнейшее уменьшение объема приводит к резкому возрастанию давления. Это объясняется малой сжимаемостью жидкости.

Для сжижения любого газа необходимо сначала охладить его до температуры ниже критической, а затем увеличить давление до значения, превышающего давление насыщенного пара.

Относительная влажность воздуха. В атмосферном воздухе интенсивность испарения воды зависит от того, насколько близко давление паров воды к давлению насыщенных паров при данной температуре. Отношение давления p водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению p_0

насыщенного водяного пара при той же температуре, выраженное в процентах, называется *относительной влажностью воздуха:*

$$\varphi = \frac{p}{p_0} 100\%. \qquad (28.1)$$

При относительной влажности, равной 100%, устанавливается динамическое равновесие между процессами испарения и конденсации воды, в результате количество воды не уменьшается и не увеличивается.

Точка росы. Так как давление насыщенного пара тем меньше, чем ниже температура, то при охлаждении воздуха находящийся в нем водяной пар при некоторой температуре становится насыщенным. Температура t_p, при которой находящийся в воздухе водяной пар становится насыщенным, называется *точкой росы.*

По точке росы можно найти давление водяного пара в воздухе p_1. Оно равно давлению насыщенного пара при температуре t_1, равной точке росы. По значениям давления пара p_1 и давления p_0 насыщенного водяного пара при данной температуре можно определить относительную влажность воздуха (28.1).

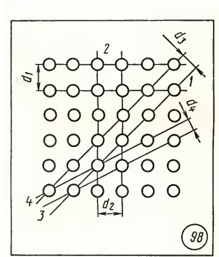
29. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ И АМОРФНЫЕ ТЕЛА

Аморфные тела и кристаллы. *Аморфными* называются тела, физические свойства которых одинаковы по всем направлениям. Примерами аморфных тел могут служить куски затвердевшей смолы, янтарь, изделия из стекла. Аморфные тела являются *изотропными* телами. Изотропность физических свойств аморфных тел объясняется беспорядочностью расположения составляющих их атомов и молекул. Твердые тела, в которых атомы или молекулы расположены упорядоченно и образуют периодически повторяющуюся внутреннюю структуру, называются *кристаллами.*

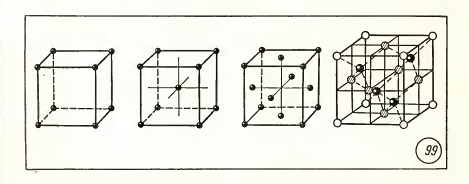
Физические свойства кристаллических тел неодинаковы в различных направлениях, но совпадают в параллельных направлениях. Это свойство кристаллов называется *анизотропностью.* Кристалл поваренной соли при раскалывании дробится на части, ограниченные плоскими поверхностями, пересекающимися под прямыми углами. Эти плоскости перпендикулярны особым направлениям в образце, по этим направлениям его прочность минимальна.

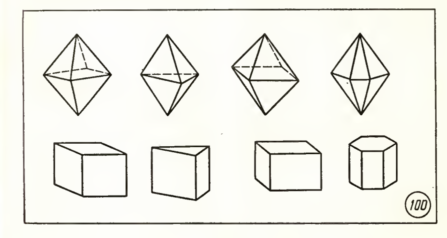
Анизотропия механических, тепловых, электрических и оптических свойств кристаллов объясняется тем, что при упорядоченном расположении атомов, молекул или ионов силы взаимодействия между ними и межатомные расстояния оказываются неодинаковыми по различным направлениям (рис. 98).

Кристаллические тела делятся на *монокристаллы* и *поликристаллы.* Монокристаллы иногда обладают геометрически правильной внешней формой, но главный признак монокристал-



ла — периодически повторяющаяся внутренняя структура во всем его объеме. Поликристаллическое тело представляет собой совокупность сросшихся друг с другом хаотически ориентированных маленьких кристаллов — кристаллитов. Поликристаллическую структуру чугуна, например, можно обнаружить, если рассмотреть с помощью лупы образец на изломе. Каждый маленький монокристалл поликристаллического тела анизотропен, но поликристаллическое тело изотропно.







Пространственная решетка. Для наглядиого представлеиия внутренией структуры кристалла применяется способ изображения его с помощью простраиствеииой *кристаллической решетки*. Кристаллической решеткой называется пространствеиая сетка, узлы которой совпадают с центрами атомов или молекул в кристалле (рис. 99).

Кристаллы могут иметь форму различных призм и пирамид, в основании которых могут лежать только правильиый треугольник, квадрат, параллелограмм и шестиугольник (рис. 100).

Представлеиия о периодической структуре кристаллов и симметрии расположения атомов в них в иастоящее время имеют строгое экспериментальиое подтверждение.

Наглядиые картины расположеиия атомов в кристалле удается получать с помощью электрониого микроскопа и иониого проектора (рис. 101).

30. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Внешнее механическое воздействие на тело вызывает смещеиие атомов из равиовесных положений и приводит к изменению формы и объема тела, т. е. к его деформации. Самые простые виды деформации — растяжение и сжатие. Растяжение испытывают тросы подъемных краиов, каиатных дорог, буксирные тросы, струны музыкальных инструментов. Сжатию подвергаются стеиы и фуидаменты зданий. Изгиб испыты-

вают балки перекрытий в зданиях, мостах. Деформация изгиба сводится к деформациям сжатия и растяжения, различным в разных частях тела.

Деформация и напряжение. Деформацию сжатия и растяжения можно характеризовать абсолютным удлинением Δl, равным разности длин образца до растяжения l_0 и после его l:

$$\Delta l = l - l_0.$$

Абсолютное удлинение Δl при растяжении положительно, при сжатии имеет отрицательное значение.

Отношение абсолютного удлинения Δl к длине образца l_0 называется *относительным удлинением* ε:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \qquad (30.1)$$

При деформации тела возникают силы упругости. Физическая величина, равная отношению модуля силы упругости к площади сечения тела, называется *механическим напряжением* σ:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \qquad (30.2)$$

За единицу механического напряжения в СИ принят *паскаль* (Па). 1 Па $= 1$ Н/м^2.

Модуль упругости. При малых деформациях напряжение прямо пропорционально относительному удлинению:

$$\sigma = E|\varepsilon|. \qquad (30.3)$$

Коэффициент пропорциональности E в уравнении (30.3) называется *модулем упругости*. Модуль упругости одинаков для образцов любой формы и размеров, изготовленных из одного материала:

$$E = \frac{\sigma}{|\varepsilon|} = \frac{Fl_0}{|\Delta l|S} = \text{const}. \qquad (30.4)$$

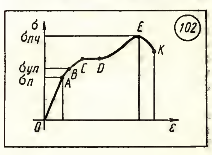
Из формулы (30.4) следует, что

$$F = \frac{ES}{l_0}\,|\Delta l|. \qquad (30.5)$$

Сравнив выражение (30.5) с законом Гука, получим, что жесткость k стержня пропорциональна произведению модуля Юнга на площадь поперечного сечения стержня и обратно пропорциональна его длине.

Диаграмма растяжения. Зависимость напряжения σ от относительного удлинения ε является одной из важнейших характеристик механических свойств твердых тел. Графическое изображение этой зависимости называется *диаграммой растяжения*. По оси ординат откладывается механическое напряжение σ, по оси абсцисс — относительное удлинение ε (рис. 102).

Закон Гука выполняется при небольших деформациях. Максимальное напряжение $\sigma_п$, при котором еще выполняется закон



Гука, называется *пределом пропорциональности*. За пределом пропорциональности (точка A) напряжение перестает быть пропорциональным относительному удлинению; до некоторого напряжения после снятия нагрузки размеры тела восстанавливаются полностью. Такая деформация называется *упругой*. Максимальное напряжение $\sigma_{уп}$, при котором деформация еще остается упругой, называется *пределом упругости* (точка B). Большинство металлов испытывает упругую деформацию до значений $\varepsilon \leqslant 0{,}1\%$.

При напряжениях, превышающих предел упругости $\sigma_{уп}$, образец после снятия нагрузки не восстанавливает свою форму или первоначальные размеры. Такие деформации называются остаточными или *пластическими*.

В области пластической деформации (участок CD) деформация происходит почти без увеличения напряжения. Это явление называется текучестью материала.

Материалы, у которых область текучести CD значительна, могут без разрушения выдерживать большие деформации. Если же область текучести материала почти отсутствует, он без разрушения сможет выдержать лишь небольшие деформации. Такие материалы называются хрупкими. Примерами хрупких материалов могут служить стекло, кирпич, бетон, чугун.

За пределом текучести кривая напряжений поднимается и достигает максимума в точке E. Напряжение, соответствующее точке E, называется *пределом прочности* $\sigma_{пч}$. После точки E кривая идет вниз и дальнейшая деформация вплоть до разрыва (точка K) происходит при все меньшем напряжении.

Дефекты в кристаллах. Способы повышения прочности твердых тел. Кристаллическими телами являются все металлические изделия — стальные каркасы зданий и мостов, рельсы железных дорог, линии электропередач, станки, машины, поезда, самолеты.

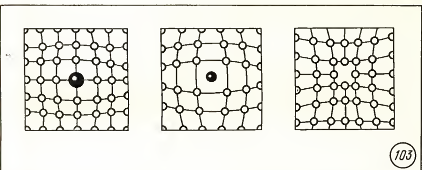
Одной из важнейших задач науки и техники является создание прочных и надежных машин, станков и зданий с минимальной затратой металлов и других материалов.

Сравнение реальной прочности кристаллов со значениями, полученными на основании теоретических расчетов, обнаруживает весьма существенные расхождения. Теоретический предел прочности в десятки и даже в сотни раз превосходит значения, получаемые при испытаниях реальных образцов.

Оказалось, что причина расхождения теории и эксперимента заключается в наличии внутренних и поверхностных дефектов в строении кристаллических решеток.

Самые простые дефекты в идеальной кристаллической решетке — точечные дефекты — возникают при замещении собственного атома чужеродным, внедрении атома в пространство между узлами решетки или при отсутствии атома в одном из узлов кристаллической решетки (рис. 103). Другой вид

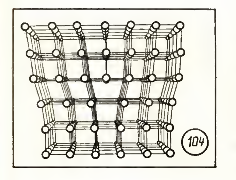




дефектов — линейные дефекты — возникает при нарушениях в порядке расположения атомных плоскостей в кристаллах. Пример такого нарушения в структуре кристалла представлен на рисунке 104.

Деформация и разрушение кристалла с линейным дефектом облегчаются потому, что вместо одновременного разрыва всех связей между атомами двух плоскостей становится возможным поочередный разрыв небольшого числа связей между атомами с постепенным перемещением дефекта в кристалле.

Для получения кристаллических материалов с высокой прочностью нужно выращивать монокристаллы без дефектов. Это очень сложная задача, и поэтому в практике этот путь пока широкого распространения не получил.



Большинство современных методов упрочнения материалов основано на другом способе. Для упрочнения кристалла с дефектами в решетке можно создать условия, при которых перемещение дефектов в кристалле затрудняется. Препятствием для перемещения дефектов в кристалле могут служить другие дефекты, специально созданные в кристаллической решетке. Так, для увеличения прочности стали применяется легирование стали — введение в расплав небольших добавок хрома, вольфрама и других элементов. Внедрение атомов чужеродных элементов в решетку кристаллов железа затрудняет перемещение линейных дефектов при деформации кристаллов, прочность стали повышается при этом примерно в три раза. Дополнительные дефекты в кристаллической решетке создаются при протяжке, дробеструйной обработке металлов. Эти виды обработки могут повышать прочность материалов примерно в два раза.

31. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Термодинамика. *Термодинамика* — это теория тепловых явлений, в которой не учитывается атомно-молекулярное строение тел. Для описания явлений в термодинамике используются понятия «термодинамическая система» и «термодинамический процесс». Совокупность физических тел, изолированных от взаимодействия с другими телами, называют изолированной *термодинамической системой.*

Любое изменение, происходящее в термодинамической системе, называется *термодинамическим процессом.*

Тело как система из составляющих его частиц обладает внутренней энергией. С позиций молекулярно-кинетической теории внутренняя энергия — это сумма потенциальной энергии взаимодействия частиц, составляющих тело, и кинетической энергии их беспорядочного теплового движения.

Кинетическая энергия беспорядочного движения частиц пропорциональна температуре T, потенциальная энергия взаимодействия зависит от расстояний между частицами, т. е. от объема V тела. Поэтому в термодинамике внутренняя энергия U тела определяется как функция его макроскопических параметров, например температуры T и его объема V:

$$U=U(T,\ V).$$

Одним из основных законов физики, установленных на основе опытов и наблюдений, является *закон сохранения и превращения энергии.* В термодинамике закон сохранения энергии формулируется так: **при любых процессах в изолированной термодинамической системе внутренняя энергия остается неизменной:**

$$U=\text{const} \quad \text{или} \quad \Delta U=0. \qquad (31.1)$$

Внутренняя энергия идеального газа. Вычислим внутреннюю энергию идеального газа. Если потенциальная энергия взаимодействия молекул равна нулю, внутренняя энергия идеального газа равна сумме кинетических энергий хаотического теплового движения всех его молекул:

$$U=NE=$$
$$=\nu N_A\frac{3}{2}\,kT=\frac{3}{2}\,\frac{m}{M}\,RT. \qquad (31.2)$$

Внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре. Следовательно, при изменении температуры идеального газа обязательно изменяется его внутренняя энергия; если температура остается постоянной, то внутренняя энергия идеального газа не изменяется.

Используя уравнение состояния идеального газа (26.7) и уравнение (31.2), можно получить еще одно выражение для вычисления внутренней энергии идеального одноатомного газа:

$$U=\frac{3}{2}\,pV. \qquad (31.3)$$

Таким образом, внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна произведению

давления p на объем V, занимаемый газом.

Два способа изменения внутренней энергии — теплопередача и совершение механической работы. Внутренняя энергия тела может изменяться только в результате его взаимодействия с другими телами. При механическом взаимодействии тел мерой энергии, переданной от одного тела к другому, является работа A.

При осуществлении теплопередачи от одного тела к другому мерой переданной энергии является количество теплоты Q.

Совершение механической работы называется *макроскопическим* способом передачи энергии, а теплопередача — *микроскопическим.*

Первый закон термодинамики. Рассмотрим три тела — *1*, *2* и *3*. Пусть между телом *1* и телом *2* осуществляется теплопередача, а между телом *1* и телом *3* происходит механическое взаимодействие (рис. 105). При теплопередаче количества теплоты Q внутренняя энергия тела *2* изменится на $\Delta U_2 = -Q$, а внутренняя энергия тела *3* в результате совершения работы изменится на $\Delta U_3 = -A$. В результате теплопередачи и механического взаимодействия внутренняя энергия каждого из трех тел изменится, но в изолированной термодинамической системе, в которую входят все три тела, по закону сохранения и превращения энергии внутренняя энергия U остается неизменной. Следовательно, сумма изменений внутренней энергии тел *1*, *2* и *3* равна нулю:

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 = 0.$$

Отсюда изменение внутренней энергии тела *1* равно сумме изменений внутренней энергии взаимодействующих с ним тел *2* и *3*, взятой с противоположным знаком:

$$\Delta U_1 = -\Delta U_2 - \Delta U_3$$

или

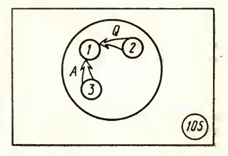
$$\Delta U_1 = Q + A.$$

Так как тело *1* является неизолированной термодинамической системой, можно сделать общий вывод: **в неизолированной термодинамической системе изменение внутренней энергии ΔU равно сумме количества теплоты Q, переданного системе, и работы A внешних сил:**

$$\Delta U = Q + A. \qquad (31.4)$$

Это выражение закона сохранения и превращения энергии называется *первым законом термодинамики.*

Вместо работы A, совершаемой внешними силами над термодинамической системой, часто удобнее бывает рассматривать работу A', совершаемую термодинамической системой над внешними телами. Так как эти



работы равны по абсолютному значению, но противоположны по знаку:

$$A = -A',$$

то первый закон термодинамики имеет второе выражение

$$\Delta U = Q - A'. \qquad (31.5)$$

В неизолированной термодинамической системе изменение внутренней энергии ΔU равно разности между полученным количеством теплоты Q и работой A', совершаемой системой.

«Вечные двигатели». Современная жизнь человека невозможна без использования самых разнообразных машин. С помощью машин человек обрабатывает землю, добывает нефть, уголь, руду, строит дома, дороги, совершает поездки по земле, полеты в воздухе и т. д.

Основным общим свойством всех этих машин является их способность совершать работу. Многие изобретатели в прошлом пытались построить машину — «вечный двигатель», способную совершать полезную работу без потребления энергии извне и без каких-либо изменений внутри машины. Все эти попытки окончились неудачей. Невозможность создания «вечного двигателя» является экспериментальным доказательством первого закона термодинамики. Согласно первому закону термодинамики мы имеем

$$A' = Q - \Delta U. \qquad (31.6)$$

Любая машина может совершать работу над внешними телами только за счет получения извне количества теплоты Q или уменьшения своей внутренней энергии ΔU.

32. КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ

Теплообмен. Процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы называется *теплообменом* или *теплопередачей*. Теплообмен происходит между телами, имеющими разную температуру. При установлении контакта между телами с различной температурой в результате взаимодействия атомов или молекул на границе соприкосновения тел происходит передача части внутренней энергии от тела с более высокой температурой к телу, у которого температура ниже.

Энергия, переданная телу в результате теплообмена, называется *количеством теплоты*.

Удельная теплоемкость. Если процесс теплопередачи не сопровождается работой ($A = 0$), то на основании первого закона термодинамики количество теплоты Q равно изменению внутренней энергии тела ΔU:

$$Q = \Delta U.$$

Средняя энергия беспорядочного поступательного движения молекул пропорциональна абсолютной температуре. Изменение

внутренней энергии тела равно алгебраической сумме изменений энергии всех атомов или молекул. Число атомов или молекул пропорционально массе тела, поэтому изменение внутренней энергии ΔU тела и, следовательно, количество теплоты Q пропорционально его массе m и изменению температуры ΔT:

$$Q = \Delta U = cm\Delta T. \qquad (32.1)$$

Коэффициент пропорциональности в уравнении (32.1) называется *удельной теплоемкостью вещества:*

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}. \qquad (32.2)$$

Единица удельной теплоемкости — $1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$. Удельная теплоемкость показывает, какое количество теплоты необходимо для нагревания 1 кг вещества на 1 К.

Удельная теплоемкость вещества не является его однозначной характеристикой. В зависимости от условий, при которых осуществляется теплопередача, а именно от значения работы A, сопровождающей этот процесс, одинаковое количество теплоты, переданное телу, может вызвать различные изменения его внутренней энергии и, следовательно, температуры. В таблицах обычно приводятся данные об удельной теплоемкости вещества при условии постоянного объема тела, т. е. при условии равенства нулю работы внешних сил.

Уравнение теплового баланса. При осуществлении процесса теплообмена между двумя телами в условиях равенства нулю работы внешних сил и в тепловой изоляции от других тел согласно закону сохранения энергии алгебраическая сумма изменений внутренней энергии тел равна нулю:

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0.$$

Если изменения внутренней энергии тел происходили только в результате теплообмена, то на основании первого закона термодинамики можно записать: $\Delta U_1 = Q_1$ и $\Delta U_2 = Q_2$. Отсюда $Q_1 + Q_2 = 0$ или

$$c_1 m_1 \Delta T_1 + c_2 m_2 \Delta T_2 = 0. \qquad (32.3)$$

Уравнение (32.3) называется *уравнением теплового баланса.*

Удельная теплота парообразования. Опыт показывает, что для превращения жидкости в пар при постоянной температуре необходимо передать ей количество теплоты $Q_п$, пропорциональное массе m жидкости, превратившейся в пар:

$$Q_п = rm. \qquad (32.4)$$

Коэффициент пропорциональности r называется *удельной теплотой парообразования.* Этот коэффициент выражается в *джоулях на килограмм* (Дж/кг). Удельная теплота парообразования показывает, какое количество теплоты необходимо для превращения 1 кг жидкости в пар при постоянной температуре. Теплота парообразования расходуется на увеличение потенциальной энергии взаимо-

действия молекул вещества и работу при расширении пара.

При конденсации происходит выделение такого же количества теплоты, какое поглощалось при испарении:

$$Q_к = -rm.$$

Удельная теплота плавления. Плавление любого кристаллического тела происходит при постоянной температуре при условии передачи телу количества теплоты $Q_{пл}$, пропорционального массе m тела:

$$Q_{пл} = \lambda m. \quad (32.5)$$

Коэффициент пропорциональности λ называется *удельной теплотой плавления*. Этот коэффициент выражается в *джоулях на килограмм* (Дж/кг). Удельная теплота плавления показывает, какое количество теплоты необходимо для плавления 1 кг кристаллического вещества при температуре плавления.

Превращение жидкости в кристаллическое тело сопровождается выделением такого же количества теплоты, какое поглощалось при его плавлении:

$$Q_{кр} = -\lambda m.$$

33. РАБОТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОБЪЕМА ГАЗА

Работа при изобарном расширении газа. Одним из основных термодинамических процессов, совершающихся в большинстве тепловых машин, является процесс расширения газа с совершением работы. Легко определить работу, совершаемую при изобарном расширении газа.

Если при изобарном расширении газа от объема V_1 до объема V_2 происходит перемещение поршня в цилиндре на расстояние l (рис. 106), то работа A', совершенная газом, равна

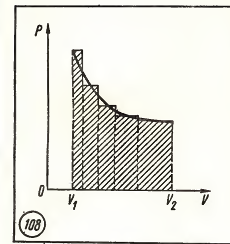
$$A' = Fl = pSl = p\Delta V, \quad (33.1)$$

где p — давление газа, ΔV — изменение его объема. Как видно из рисунка 107, при изображении изобарного процесса расширения газа в координатных осях p, V площадь фигуры, ограниченной графиком процесса, ординатами V_1 и V_2, осью абсцисс, пропорциональна работе газа A'.

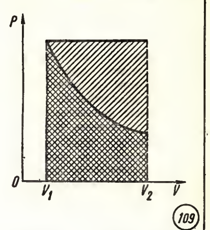
Работа при произвольном процессе расширения газа. Произвольный процесс расширения газа от объема V_1 до объема V_2 можно представить как совокупность чередующихся изобарных и изохорных процессов.

При изохорных процессах работа равна нулю, так как поршень в цилиндре не перемещается. Работа при изобарных процессах пропорциональна площади фигуры на диаграмме p, V под соответствующим участком изобары (рис. 108). Следовательно, работа при произвольном процессе расширения газа прямо пропорциональна площади фигуры под соответствующим участком графика процесса на диаграмме p, V.

Работа при изотермическом расширении газа. Сравнивая пло-



108



109

щади фигур под участками изотермы и изобары (рис. 109), можно сделать вывод, что расширение газа от объема V_1 до объема V_2 при одинаковом начальном значении давления газа сопровождается в случае изобарного расширения совершением большей работы.

Работа при сжатии газа. При расширении газа направление вектора силы давления газа совпадает с направлением вектора перемещения, поэтому работа A', совершенная газом, положительна ($A'>0$), а работа A внешних сил отрицательна: $A=-A'<0$.

При сжатии газа направление вектора внешней силы совпадает с направлением перемещения, поэтому работа A внешних сил положительна ($A>0$), а работа A', совершенная газом, отрицательна ($A'<0$).

Адиабатный процесс. Кроме изобарного, изохорного и изотермического процессов, в термодинамике часто рассматриваются адиабатные процессы.

Адиабатным процессом называется процесс, происходящий в термодинамической системе при отсутствии теплообмена с окружающими телами, т. е. при условии $Q=0$.

Отсутствие теплообмена с окружающей средой может быть обеспечено хорошей теплоизоляцией газа. Быстрые процессы расширения или сжатия газа

P
l
$A' = p\Delta V$
0
V_1
V_2 V

106

107

могут быть близкими к адиабатному и при отсутствии теплоизоляции, если время, за которое происходит изменение объема газа, значительно меньше времени, необходимого для установления теплового равновесия газа с окружающими телами.

Примерами адиабатных процессов могут служить процессы сжатия воздуха в цилиндре воздушного огнива, в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. В соответствии с первым законом термодинамики, при адиабатном сжатии изменение внутренней энергии газа ΔU равно работе внешних сил A:

$$\Delta U = A. \qquad (33.2)$$

Так как работа внешних сил при сжатии положительна, внутренняя энергия газа при адиабатном сжатии увеличивается, его температура повышается.

При адиабатном расширении газ совершает работу A' за счет уменьшения своей внутренней энергии:

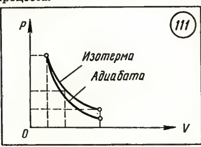
$$\Delta U = -A', \qquad (33.3)$$

поэтому температура газа при адиабатном расширении понижается. Это можно обнаружить в следующем опыте. Если в бутылку, содержащую насыщенный водяной пар, накачивать с помощью насоса воздух, то пробка вылетает (рис. 110). Работа A' по выталкиванию пробки совершается воздухом за счет уменьшения его внутренней энергии, так как расширение воздуха происходит за очень короткое время и теплообмен с окружающей средой не успевает произойти. Образование капель тумана доказывает, что при адиабатном расширении воздуха его температура понизилась и опустилась ниже точки росы.


110

График адиабатного процесса. Поскольку при адиабатном сжатии температура газа повышается, то давление газа с уменьшением объема растет быстрее, чем при изотермическом процессе. Понижение температуры газа при адиабатном расширении приводит к тому, что давление газа убывает быстрее, чем при изотермическом расширении.

График адиабатного процесса в координатных осях p, V представлен на рисунке 111. На том же рисунке для сравнения приведен график изотермического процесса.



111

34. ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Потребление энергии. Основным источником энергии, используемой различными машинами в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте и в быту, в настоящее время являются различные виды химического горючего. Из всей энергии, потребляемой человечеством в год, около 90% получается за счет сжигания угля, нефти и газа.

Производство и потребление энергии на душу населения является одним из наиболее важных показателей уровня экономического и технического развития страны. Среднее потребление энергии на одного жителя Земли составляет около 170 млн. Дж в сутки, а в СССР на одного человека приходится примерно в 4 раза большее количество энергии — около 700 млн. Дж в сутки.

Физически развитый человек может совершить за рабочий день полезную работу около 1 миллиона джоулей. Следовательно, в нашей стране человек в среднем потребляет количество энергии, примерно в 700 раз большее полезной работы, которую он может совершить.

Тепловые машины освободили человека от тяжелого физического труда в промышленности и сельскохозяйственном производстве. Они выполняют работу в сотни и тысячи раз больше той, которую мог бы выполнить человек без машин, способствуя повышению материального благосостояния человека.

Основное назначение большинства применяемых в современной технике тепловых машин заключается в превращении внутренней энергии топлива в механическую энергию. Механическая энергия далее может превращаться в электрическую энергию и любые другие виды энергии.

Основные части тепловой машины. Выясним, какие основные части должна иметь тепловая машина, предназначенная для совершения механической работы A' за счет количества теплоты Q, полученного при сжигании топлива.

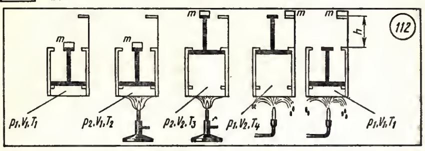
Обычно в тепловых машинах механическая работа совершается расширяющимся газом. Газ, совершающий работу при расширении, называется *рабочим телом.* Рабочим телом часто служит воздух или водяные пары.

Расширение газа происходит в результате повышения его температуры и давления при нагревании. Устройство, от которого рабочее тело получает количество теплоты Q, называется *нагревателем.*

Рассмотрим упрощенную модель тепловой машины, состоящую из цилиндра, заполненного воздухом, и поршня (рис. 112).

Поместим на поршень тело массой m, предварительно приняв меры против сжатия газа в цилиндре под действием груза (например, установив специальные упоры внутри цилиндра, предотвращающие дальнейшее опускание поршня).

Расположим под цилиндром нагреватель. По мере нагревания газа в цилиндре его давление

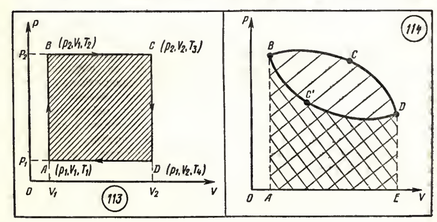


возрастает, однако объем остается неизменным до тех пор, пока при некотором значении температуры T_2 давление не достигнет значения p_2, при котором вес поршня с грузом mg и сила атмосферного давления, равная p_1S, уравниваются с силой давления газа на поршень p_2S. Этому процессу на диаграмме p, V соответствует изохора AB (рис. 113).

При дальнейшем нагревании газа поршень придет в движение. Давление поршня с грузом на газ остается постоянным, поэтому расширение происходит по изобарному закону. При подъеме груза на высоту h объем газа в цилиндре увеличивается от V_1 до V_2, температура в конце изобарного процесса расширения газа достигает значения T_3. Этому процессу на диаграмме p, V соответствует изобара BC.

Когда поршень коснется ограничителя в верхней части цилиндра, снимем груз и прекратим нагревание.

Цель достигнута, груз поднят. Однако подобная машина одноразового действия не представляет интереса для практики. Чтобы поднять другой груз, необходимо опустить поршень, т. е. сжать газ. Но если сжимать газ при температуре T_3 до объема V_1, то работа, совершаемая при сжатии газа, окажется больше работы, совершенной газом при изобарном



расширенни. Следовательно, таким путем не удастся осуществнть периодический процесс совершения механической работы за счет передачи теплоты от иагревателя рабочему телу машииы.

Для уменьшеиия работы, совершаемой при сжатии газа в цилиндре, его иужно перед сжатием охладить. Тогда сжатие будет происходить при давлении p_1, меньшем p_2, и работа, совершаемая прн сжатии, окажется меньше работы, совершенной газом при расширении. Следовательно, для периодической работы тепловой машины иеобходима еще одиа часть машииы, иазываемая ***холодильником***.

Рабочий цикл тепловой машины. Для охлаждения газа иаправим иа дно цилнндра струю холодиой воды. Понижение температуры газа будет происходить прн неизменном объеме до тех пор, пока давление газа в цилиндре ие достигиет значення p_1 прн температуре T_4. Этому процессу иа диаграмме соответствует изохора CD.

Для возвращеиия газа в исходиое состояние, характеризуемое давлеиием p_1, объемом V_1 и температурой T_1, иеобходимо продолжить его охлаждеиие до температуры T_1. Этому процессу соответствует нзобара DA.

Процессы, в результате совершеиия которых газ возвращается в исходное состояине, называют *круговыми* или *циклическими*. Рабочий цикл рассмотреиной тепловой машины состонт из двух изохор и двух нзобар, образующих на днаграмме p, V прямоугольник $ABCD$.

Работа тепловой машины за цикл. Покажем, что полезная работа, пронзведенная машиной в результате совершения рабочего цикла, пропорциональиа площади цикла на днаграмме p, V.

Если при работе тепловой машииы изменеиие состояния рабочего тела пронсходит по замкнутому циклу, то полезиую работу за одии цикл можно иайти как сумму работ при расширении и при сжатии газа. Пусть изменение состояния газа за цикл представлеио диаграммой в координатных осях p, V (рис. 114). Работа газа при расширении положительна и пропорциональиа площади фигуры $ABCDE$. Работа газа при сжатии отрицательна и пропорциональна площади фигуры $ABC'DE$. Поэтому полиая работа газа, равная сумме работ при расширении н сжатии, оказывается пропорциональиой площади фигуры $BCDC'B$ цикла на диаграмме в координатных осях p, V.

Рабочий цикл тепловой машины и ее КПД. В результате совершения рабочего цнкла газ возвращается в иачальное состояние, его виутреиияя энергия прииимает первоиачальное зиачение. Следовательио, за цикл изменеине виутренней энергии рабочего тела равно иулю:

$$\Delta U = 0.$$

Согласно первому закону термоднпамики

$$\Delta U = Q - A' = 0,$$

или $A' = Q$.

Работа A', совершениая рабочим телом за цикл, равна полученному за цикл количеству



теплоты Q. Количество теплоты Q, полученное рабочим телом за цикл, равно разности количества теплоты Q_1, полученного от нагревателя, и количества теплоты Q_2, отданного холодильнику:

$$Q = Q_1 - Q_2.$$

Следовательно,

$$A' = Q_1 - Q_2.$$

Коэффициент полезного действия η, равный отношению полезно использованной энергии к затраченной энергии, для тепловой машины оказывается равным

$$\eta = \frac{A'}{Q_1}, \text{ или } \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (34.1)$$

Французский инженер С а д и К а р н о (1796—1832) в 1824 г. установил чрезвычайно важную для практики зависимость КПД тепловой машины от температуры T_1 нагревателя и температуры T_2 холодильника: **независимо от конструкции и выбора рабочего тела максимальное значение КПД тепловой машины определяется выражением**

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (34.2)$$

Любая реальная тепловая машина может иметь КПД, не превышающий это максимальное значение:

$$\eta \leqslant \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (34.3)$$

Выражение для максимального значения КПД тепловой машины показывает, что для повышения коэффициента полезного действия тепловых машин существует два пути — повышение температуры T_1 нагревателя и понижение температуры T_2 холодильника. КПД тепловой машины мог бы стать равным единице, если бы имелась возможность использовать холодильник с температурой, равной абсолютному нулю.

Однако этот путь даже теоретически неосуществим, так как абсолютный нуль, согласно представлениям термодинамики, не может быть достигнут.

Наиболее приемлемыми холодильниками для реальных тепловых машин являются атмосферный воздух или вода при температуре около 300 К.

Следовательно, основной путь повышения КПД тепловых машин — это повышение температуры нагревателя.

Необратимость тепловых процессов. При соприкосновении тел процесс теплопередачи происходит самопроизвольно от горячего тела к холодному до тех пор, пока оба тела не будут иметь одинаковые температуры. Все наблюдали, как налитый в чашку горячий чай постепенно остывает, нагревая окружающий воздух. Но никто не видел, чтобы теплый чай в чашке вдруг закипел за счет охлаждения окружающего его воздуха.

Процессы теплопередачи самопроизвольно осуществляются только в одном направлении, поэтому их называют необратимыми процессами.

Всегда осуществляется теплопередача тепла от горячего тела к холодному, потому что равномерное распределение быстрых и медленных молекул в двух сопри-



касающихся телах является более вероятным, чем такое распределение, при котором в одном теле будут только «быстрые» молекулы, а в другом — только «медленные».

Системы, состоящие из большого числа частиц, будучи предоставленные самим себе, самопроизвольно переходят из состояний менее вероятных в состояния более вероятные.

«Вечный двигатель второго рода». Для работы обычного теплового двигателя необходимо иметь нагреватель и холодильник. Очень заманчивой кажется задача создания тепловой машины, которая могла бы совершить механическую работу с использованием нагревателя.

Можно подсчитать, что при охлаждении Мирового океана только на 1 К можно получить энергию, достаточную для обеспечения всех потребностей человечества при современном уровне ее потребления на 14000 лет.

Возможность создания такой машины, называемой «вечным двигателем второго рода», не противоречит первому закону термодинамики. Однако все известные на сегодня результаты опытов свидетельствуют о том, что создание «вечного двигателя второго рода» является столь же неразрешимой задачей, как и изготовление «вечного двигателя первого рода». Этот опытный факт принят в термодинамике в качестве второго основного постулата — второго закона термодинамики.

Теплопередача самопроизвольно происходит только в одном направлении — от горячего тела к холодному. Значит, чтобы энергия теплового движения молекул воды Мирового океана превратилась в механическую энергию, необходимо иметь рабочее тело, температура которого ниже температуры воды в океане.

Второй закон термодинамики. Второй закон термодинамики имеет несколько эквивалентных по своему физическому содержанию формулировок. Приведем две из них.

Неосуществим термодинамический процесс, в результате которого происходила бы передача тепла от одного тела к другому, более горячему, без каких-либо других изменений в природе.

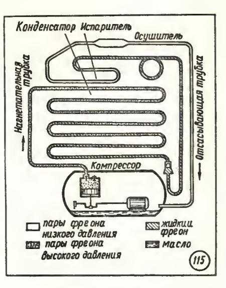
Невозможно построить периодически действующую машину, которая непрерывно превращала бы теплоту в работу только за счет охлаждения одного тела, без того чтобы в окружающих телах не произошло одновременно каких-либо изменений.

Физический смысл второго закона термодинамики заключается в том, что энергия теплового движения молекул вещества в одном отношении качественно отличается от всех других видов энергии — механической, электрической, химической, ядерной и т. д. Это отличие заключается в том, что энергия любого вида, кроме энергии теплового движения молекул, может полностью превратиться в любой другой вид энергии, в том числе в энергию теплового движения. Энергия же теплового движения молекул может испытать превращение в любой другой вид энергии лишь частично. В результате этого любой физический процесс, в котором происходит прев-

ращение какого-либо вида энергии в энергию теплового движения молекул, является необратимым процессом, т. е. он не может быть осуществлен полностью в обратном направлении.

Холодильник. Не опровергает ли второй закон термодинамики работа холодильника? Действие его как раз заключается в том, что от более холодного тела, находящегося в морозильнике, отнимается некоторое количество теплоты и передается более нагретому телу. Этим более нагретым телом является воздух в комнате, который в результате работы холодильника нагревается до еще более высокой температуры от конденсатора, обычно укрепленного на задней стенке холодильного шкафа.

Работа холодильника совершается не в противоречии со вторым законом термодинамики, а в полном соответствии с ним. Холодильник и воздух комнаты не составляют замкнутой системы. Холодильник необходимо подключить к электрической сети. Электрическая энергия с помощью электродвигателя превращается в механическую энергию, затем механическая энергия в результате работы компрессора холодильника превращается в конечном счете в энергию теплового движения молекул деталей холодильника и окружающих его тел. Следовательно, переход тепла от холодного тела к горячему не является единственным результатом работы холодильника, так как сопровождается превращением энергии электрического тока в энергию теплового движения.



Рабочим телом в домашнем компрессионном холодильнике (рис. 115) служит газ фреон. Фреоном заполнена система конденсатора и испарителя. Компрессор, приводимый в действие электродвигателем, откачивает газообразный фреон из испарителя и нагнетает его в конденсатор. При сжижении фреон нагревается. Охлаждение его до комнатной температуры производится в конденсаторе, расположенном обычно на задней стенке холодильного шкафа. Охлажденный до комнатной температуры при повышенном давлении, создаваемом в конденсаторе с помощью компрессора, фреон переходит в жидкое состояние. Из конденсатора жидкий фреон через капиллярную трубку поступает в испаритель. Откачкой паров фреона из испарителя с помощью компрессора в нем поддерживается пониженное давление. При пониженном давлении

в испарителе жидкий фреон кипит и испаряется даже при температуре ниже 0 °C. Теплота на испарение фреона отбирается от стенок испарителя, вызывая их охлаждение. Откачанные пары фреона поступают в кожух компрессора, оттуда — снова в конденсатор и т. д. по замкнутому циклу.

Самая низкая температура, которая может быть получена в испарителе (морозильной камере), определяется значением давления паров фреона, так как температура кипения фреона, как и любой другой жидкости, понижается с понижением давления. При постоянной скорости поступления жидкого фреона из конденсатора в испаритель через капиллярную трубку давление паров фреона в испарителе будет тем ниже, чем дольше работает компрессор. Если нет нужды добиваться понижения температуры в испарителе до предельно достижимого значения, то работа компрессора периодически останавливается путем выключения электромотора, приводящего его в действие. Компрессор выключается автоматом, следящим за поддержанием в холодильном шкафу заданной температуры.

Рабочий цикл холодильной машины. Некоторые тепловые машины можно с помощью другого двигателя, например электромотора, заставить совершать цикл в обратном направлении. В обратных процессах (циклах) холодильником по-прежнему называют тело с более низкой температурой, хотя оно теперь отдает тепло, а нагревателем — тело, имеющее более высокую температуру, хотя теперь оно его получает. При этом рабочее тело будет получать за один цикл от холодильника количество теплоты Q_2, отдавая нагревателю количество теплоты Q_1, которое больше на величину работы A, совершаемой электромотором:

$$Q_1 = Q_2 + A.$$

Можно сказать, что в данном случае тепловая машина производит отрицательную работу:

$$Q_2 - Q_1 = -A.$$

В результате проведения обратного цикла увеличивается разность температур между нагревателем и холодильником. В этих условиях тепловая машина работает как «тепловой насос». За счет работы, совершаемой электромотором, машина переносит количество теплоты Q_2 от холодного тела к горячему.

35. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

Паровая машина. Первые практически действующие универсальные паровые машины были созданы русским изобретателем Иваном Ивановичем Ползуновым и англичанином Джемсом Уаттом.

В машине Ползунова из котла по трубам пар с давлением, немного превышающим атмо-

сферное, поступал поочередио в два цнлиидра с поршиямн. Для улучшеиия уплотиения поршни залнвались водой. Посредством тяг с цепямн движеиие поршией передавалось мехам для трех меделлавнльных печей.

Постройка машнны Ползуиова была закончена в августе 1766 г. Она имела высоту 11 м, емкость котла 7 $м^3$, высоту цнлиндров 2,8 м, мощиость 29 кВт.

Машина Ползунова создавала непрерывиое усилие и была первой универсальной машиной, которую можио было применять для прнведения в движение любых заводскнх механизмов.

В паровой машиие Д. Уатта два цилиидра были замеиены одним закрытым. Пар поступал попеременио по обе стороны поршня, толкая его то в одиу, то в другую сторону. В такой машине двойиого действия отработавший пар коиденсировался ие в цилиндре, а в отдельном от него сосуде — кондеисаторе. Постоянство числа оборотов маховнка поддерживалось цеитробежиым регулятором. Разработка парового двигателя была завершеиа Д. Уаттом в 1784 г.

Главиым недостатком первых паровых машин был ннзкий КПД. У паровозов КПД не превышал 9%.

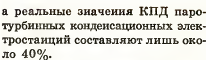
Паровая турбина и ТЭЦ. Значительиого повышеиия КПД удалось достигнуть в результате изобретеиня паровой турбины.

Первая паровая турбнна, нашедшая практическое прнмеиение, была изготовлена шведским иииженером Густавом Лавалем в 1889 г. Для работы паровой турбины за счет эиергии, освобождаемой при сжнгании каменного угля илн мазута, вода в котле нагревается н превращается в пар. Пар нагревается до температуры более 500 °C и при высоком давленни выпускается из котла через сопло. При выходе пара внутреиняя эиергия нагретого пара преобразуется в книетическую энергию струн пара. Скорость струи пара может достигиуть 1000 м/с. Струя пара направляется на лопатки турбины и приводнт турбину во вращение. На одном валу с турбиной находится ротор электрнческого генератора. Такнм образом энергия топлива в конечном счете преобразуется в электрическую энергию.

Современные паровые турбииы обладают высоким КПД преобразоваиия кннетической энергии струи пара в механическую энергию, превышающим 90%. Поэтому электрические генераторы практически всех тепловых и атомных электростанций мира, дающне более 80% всей вырабатываемой электроэнергии, приводятся в действие паровыми турбииами.

Температура пара, применяемого в современных паротурбинных устаиовках, ие превышает 580 °C (температура нагревателя $T_1 = 853$ К), а температура пара иа выходе из турбииы обычио ие ниже 30 °C (температура холодильника $T_2 = 303$ К); поэтому максимальное значеине КПД паротурбнниой установки как тепловой машины равно

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{853\ \text{К} - 303\ \text{К}}{853\ \text{К}} = 0{,}65,$$



а реальные значения КПД паротурбинных конденсационных электростанций составляют лишь около 40%.

Мощность современных энергоблоков котел — турбина — генератор достигает $1{,}2 \cdot 10^6$ кВт.

Для повышения КПД на многих электростанциях тепло, отбираемое от паровой турбины, используется для нагревания воды. Горячая вода поступает в систему бытового и промышленного теплоснабжения.

Коэффициент полезного использования топлива в такой теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) повышается до 60—70%.

Тепловые машины и транспорт. Различные виды тепловых машин являются основой современного транспорта. Тепловые машины приводят в движение автомобили и тепловозы, речные и морские корабли, самолеты и космические ракеты. Одной из наиболее распространенных тепловых машин, используемых в различных транспортных средствах, является двигатель внутреннего сгорания.

Двигатель внутреннего сгорания. Среди способов увеличения КПД тепловых двигателей один оказался особенно эффективным. Сущность его состояла в устранении части потерь теплоты перенесением места сжигания топлива и нагревания рабочего тела внутрь цилиндра.

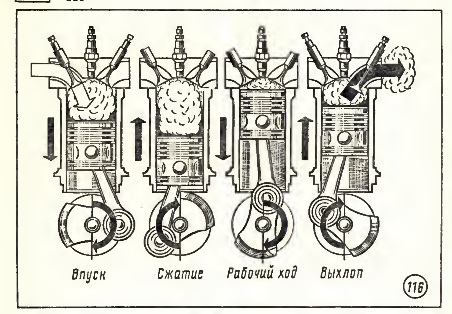
Отсюда и происхождение названия — «двигатель внутреннего сгорания».

Первый двигатель внутреннего сгорания был создан в 1860 г. французским инженером Этьеном Ленуаром, но эта машина была еще весьма несовершенной.

В 1862 г. французский изобретатель Бо де Роша предложил использовать в двигателе внутреннего сгорания четырехтактный цикл: 1) всасывание; 2) сжатие; 3) горение и расширение; 4) выхлоп. Эта идея была использована немецким изобретателем Н. Отто, построившим в 1878 г. первый четырехтактный газовый двигатель внутреннего сгорания. КПД этого двигателя достигал 22%, что превосходило значения, полученные при использовании двигателей всех предшествующих типов.

Развитие нефтяной промышленности в конце XIX в. дало новые виды топлива — керосин и бензин. В бензиновом двигателе для более полного сгорания топлива перед впуском в цилиндр его смешивают с воздухом в специальных смесителях, называемых карбюраторами. Воздушно-бензиновую смесь называют горючей смесью.

Для полного сгорания в составе смеси на один килограмм бензина должно приходиться не менее пятнадцати килограммов воздуха. Это означает, что рабочим телом в двигателях внутреннего сгорания фактически является воздух, а не пары бензина. В отличие от паровых машин здесь топливо сжигается для нагревания газа, а не для превращения жидкости в пар. Правда, наряду с нагреванием воздуха происходит и частичное изменение его состава: вместо молекул кислорода появляется несколько большее количество молекул углекислого газа и водяного

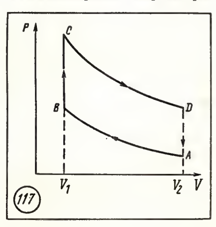


пара. Азот, составляющий более 3/4 воздуха, испытывает лишь нагревание.

При движении поршня от верхнего положения до нижнего через впускной клапан происходит засасывание горючей смеси в цилиндр (рис. 116). Этот процесс происходит при постоянном давлении. При обратном ходе поршня начинается сжатие горючей смеси. Сжатие происходит быстро, и поэтому процесс близок к адиабатическому. На диаграмме pV ему соответствует участок AB (рис. 117).

В конце такта сжатия происходит воспламенение горючей смеси электрической искрой. Быстрое сгорание паров бензина сопровождается передачей рабочему телу — воздуху — количества тепла, резким возрастанием температуры, давления воздуха и продуктов сгорания. За короткое время горения смеси поршень практически не изменяет своего положения в цилиндре, поэтому процесс нагревания газа в цилиндре можно считать изохорическим и изобразить его на диаграмме pV участком BC.

Под действием давления горячих газов поршень совершает ра-



бочий ход, газы адиабатически расширяются от объема V_1 до объема V_2; этому процессу соответствует на диаграмме pV адиабата CD.

В конце рабочего такта открывается выпускной клапан и рабочее тело соединяется с окружающей атмосферой. Выпуск отработанных газов сопровождается передачей количества тепла Q_2 окружающему воздуху, играющему роль охладителя.

Для поршневых двигателей внутреннего сгорания важной характеристикой, определяющей полноту сгорания топлива и значительно влияющей на величину КПД, является степень сжатия горючей смеси:

$$\varepsilon=\frac{V_2}{V_1},$$

где V_2 и V_1 — объемы в начале и в конце сжатия. С увеличением степени сжатия возрастает начальная температура горючей смеси в конце такта сжатия, что способствует более полному ее сгоранию. В карбюраторных двигателях увеличению степени сжатия выше 8—9 препятствует самовоспламенение (детонация) горючей смеси, происходящее еще до того, как поршень достигнет верхней мертвой точки. Это явление оказывает разрушающее действие на двигатель и снижает его мощность и КПД. Достигнуть высоких степеней сжатия без детонации удалось увеличением скорости движения поршня при повышении числа оборотов двигателя до 5—6 тыс. об/мин и применением бензина со специальными антидетонационными присадками.

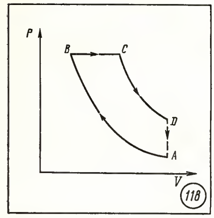
Карбюраторные двигатели внутреннего сгорания широко применяются в автомобильном транспорте. Они приводят в движение почти все легковые и многие грузовые автомобили.

Двигатель Дизеля. Для дальнейшего повышения КПД двигателя внутреннего сгорания в 1892 г. немецкий инженер Рудольф Дизель предложил использовать еще большие степени сжатия рабочего тела.

Высокая степень сжатия без детонации достигается в двигателе Дизеля за счет того, что сжатию подвергается не горючая смесь, а только воздух. По окончании процесса сжатия в цилиндр впрыскивается горючее. Для его зажигания не требуется никакого специального устройства, так как при высокой степени адиабатического сжатия воздуха его температура повышается до 600—700 °С. Горючее, впрыскиваемое с помощью топливного насоса через форсунку, воспламеняется при соприкосновении с раскаленным воздухом.

Подача топлива управляется особым регулятором, в результате чего процесс горения протекает не столь кратковременно, как в карбюраторном двигателе, а происходит изобарно, а затем адиабатно. При обратном движении поршня осуществляется выхлоп. Диаграмма цикла в двигателе Дизеля представлена на рисунке 118.

Современные дизели имеют степень сжатия $\varepsilon=16-21$ и КПД около 40%. Более высокий коэффициент полезного действия дизельных двигателей обусловлен тем, что вследствие более высокой степени сжатия начальная тем-



пература горения смеси (480—630 °C) у них выше, чем у карбюраторных двигателей (330—480 °C). Этим обеспечивается более полное сгорание дизельного топлива. Дизельные двигатели используются в мощных грузовых автомобилях, тракторах, иа судах речного и морского транспорта, тепловозах.

Газовая турбина. Все более широкое применение в современном транспорте получают газотурбинные двигатели. Газотурбинная установка состоит из воздушного компрессора *1*, камер сгорания *2* и газовой турбины *3* (рис. 119). Компрессор состоит из ротора, укрепленного на одной оси с турбиной, и неподвижного направляющего аппарата.

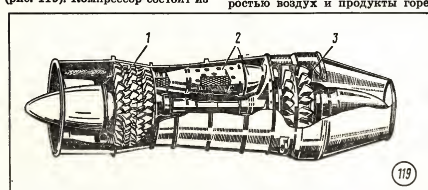
При работе турбины ротор компрессора вращается. Лопатки ротора имеют такую форму, что при их вращении давление перед компрессором понижается, а за ним повышается. Воздух засасывается в компрессор, несколько ступеней лопаток компрессора обеспечивают повышение давления воздуха в 5—7 раз.

Процесс сжатия протекает адиабатно, поэтому температура воздуха повышается до температуры 200 °C и более.

Сжатый воздух поступает в камеру сгорания. Одновременно через форсунку в нее впрыскивается под большим давлением жидкое топливо — керосин, мазут.

При горении топлива воздух, служащий рабочим телом, получает некоторое количество тепла и нагревается до температуры 1500— 2200 °C. Нагревание воздуха происходит при постоянном давлении, поэтому воздух расширяется и скорость его движения увеличивается.

Движущийся с большой скоростью воздух и продукты горе-



ния направляются в турбину. Переходя от ступени к ступени, они отдают свою кинетическую энергию лопаткам турбины. Часть полученной турбиной энергии расходуется на вращение компрессора, а остальная используется для вращеиия винта самолета, винта морского корабля или колес автомобиля.

Вместо вращения вннта самолета, теплохода или ротора электрогенератора газовая турбина может быть использована как реактивный двигатель. Воздух и продукты горения выбрасываются из газовой турбины с большой скоростью. Реактивная сила тяги, возникшая при этом, может быть использована для движения самолета, теплохода или железнодорожного траиспорта.

Турбореактивиыми двигателями оборудоваиы известные всему миру самолеты ИЛ-62, ТУ-154.

Тепловые машины и охрана окружающей среды. Непрерывное развитие энергетики, автомобильного и других видов транспорта, возрастание потребления угля, нефти и газа в промышленности и на бытовые нужды увеличивает возможности удовлетворения жизненных потребностей человека. Одиако в настоящее время количество ежегодно сжигаемого в различиых тепловых машинах химнческого топлива настолько велико, что все более сложной проблемой становится охрана окружающей среды от вредного влияния продуктов сгорания.

Отрицательное влияние тепловых машин на окружающую среду связано с действием разных факторов.

Во-первых, при сжиганни топлива используется кислород из атмосферного воздуха, поэтому содержание кислорода в воздухе постепенно уменьшается. Если в СССР пока количество кислорода, пронзводимого лесами, превышает количество кислорода, потребляемого промышленностью, то, например, в США леса восстанавливают лишь 60% используемого промышленностью кислорода.

Во-вторых, сжиганне топлива сопровождается выделением в атмосферу углекислого газа. За последние двадцать лет содержание углекислого газа в атмосфере Земли увелнчилось примерио на 5%.

Молекулы оксида углерода способны поглощать инфракрасное излучение. Поэтому увеличенне содержаиия углекислого газа в атмосфере изменяет ее прозрачность. Инфракрасное излучение, испускаемое земной поверхностью, все в большей мере поглощается в атмосфере. Дальиейшее существенное увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере может привести к повышению ее температуры.

В-третьих, при сжигании угля и нефти атмосфера загрязияется азотными и серными соединениями, вредиыми для здоровья человека. Особенно существенно это загрязнение в крупиых городах и промышленных центрах.

Более половнны всех загрязнений атмосферы создает транспорт. Кроме оксида углерода и соединеиий азота, автомобильные двигатели ежегодно выбрасывают в атмосферу 2—3 млн. т свинца. Соединения свинца добав-

ляют в автомобильный бензин для предотвращения детонации топлива в двигателе, т. е. слишком быстрого сгорания топлива.

Один из путей уменьшения загрязнения окружающей среды —

Формулы

Основы молекулярно-кинетической теории

$$\nu=\frac{N}{N_A}, \quad M=\frac{m}{\nu}, \quad m_0=\frac{m}{N}=\frac{m}{\nu N_A}=\frac{M}{N_A}.$$

Давление идеального газа

$$p=\frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2=\frac{1}{3}\rho\bar{v}^2, \quad p=\frac{2}{3}n\bar{E}, \quad p=nkT.$$

Энергия молекул и температура

$$T=t+273, \quad \bar{E}=\frac{3}{2}kT.$$

Уравнение состояния идеального газа

$$pV=\nu RT, \quad pV=\frac{m}{M}RT, \quad R=kN_A.$$

Внутренняя энергия одноатомного идеального газа

$$U=\frac{3}{2}kTN=\frac{3}{2}kT\nu N_A=\frac{3}{2}\nu RT=\frac{3}{2}pV;$$

$$\Delta U=\frac{3}{2}\nu R\Delta T=\frac{3}{2}\Delta(pV).$$

Первый закон термодинамики

$$\Delta U=A+Q, \quad \Delta U=Q-A', \quad Q=\Delta U+A'.$$

КПД теплового двигателя

$$\eta=\frac{A'}{Q_1}, \quad A'=Q_1-Q_2, \quad \eta=\frac{Q_1-Q_2}{Q_1}, \quad \eta_{max}=\frac{T_1-T_2}{T_1}.$$

Теплообмен

$$Q=cm\Delta t, \quad Q_п=rm, \quad Q_{пл}=\lambda m.$$

переход от использования в автомобилях карбюраторных бензиновых двигателей к использованию дизельных двигателей, в топливо которых не добавляют соединения свинца.

Обозначения	Единицы и значения величин
N — число молекул	
m — масса вещества	1 кг
m_0 — масса молекулы	
ν — количество вещества	1 моль
N_A — постоянная Авогадро	$N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
p — давление	1 Па
n — концентрация молекул	1 м$^{-3}$
$\overline{v^2}$ — среднее значение квадрата скорости молекул	
$\bar{E}$ — среднее значение кинетической энергии теплового движения молекул	
t — температура по шкале Цельсия	1 °C
T — абсолютная температура	1 К
k — постоянная Больцмана	$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$
V — объем	1 м^3
R — молярная газовая постоянная (универсальная газовая постоянная)	$R = 8{,}31$ Дж·моль$^{-1}$·К$^{-1}$
U — внутренняя энергия	Дж
Q — количество теплоты	Дж
A — работа, совершенная внешними силами над системой	Дж
A' — работа, совершенная системой над внешними телами	
η — коэффициент полезного действия	
Q_1 — количество теплоты, полученной от нагревателя	
Q_2 — количество теплоты, отданной холодильнику	
c — удельная теплоемкость	1 Дж/(кг·К)
r — удельная теплота парообразования	1 Дж/кг
λ — удельная теплота плавления	1 Дж/кг

56. Какое давление на стенки сосудов оказывал бы идеальный газ с концентрацией 100 миллиардов молекул в кубическом миллиметре при средней квадратичной скорости движения молекул 1 км/с и массе молекулы $3 \cdot 10^{-27}$ кг?

Решение

Для вычисления давления идеального газа используем основное уравнение молекулярно-кинетической теории

$$p = 1/3 n m \overline{v^2}.$$

Все величины необходимо выразить в единицах СИ:

$$n = 10^{11}\ \text{мм}^{-3} = 10^{20}\ \text{м}^{-3};$$

$$m = 3 \cdot 10^{-27}\ \text{кг}; \qquad v = 1\ \text{км} \cdot \text{с}^{-1} = 10^{3}\ \text{м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Подставляя значения величин, получаем

$$p = 1/3 \cdot 10^{20}\ \text{м}^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-27}\ \text{кг} \cdot 10^{6}\ \text{м}^{2} \cdot \text{с}^{-2} \approx 0{,}1\ \text{Па}.$$

Давление идеального газа с заданными параметрами оказывается в миллион раз меньше нормального атмосферного давления.

57. Считая воздух идеальным газом, оцените скорость теплового движения молекул газа при нормальных условиях.

Решение

Для решения задачи можно использовать основное уравнение молекулярно-кинетической теории

$$p = 1/3 m n \overline{v^2}.$$

Так как произведение массы молекулы m на концентрацию молекул n равно плотности ρ газа, то давление идеального газа равно

$$p = 1/3 \rho \overline{v^2}.$$

где $\overline{v^2}$ — среднее значение квадрата скорости теплового движения молекул.

Из этого уравнения следует, что для оценки скорости теплового движения молекул идеального газа можно использовать уравнение

$$v = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}.$$

Давление воздуха при нормальных условиях равно примерно 10^5 Па, плотность 1,3 кг$\cdot$м$^{-3}$. Подставляя эти значения, получаем

$$v = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{5}\ \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}}{1{,}3\ \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}}} \approx 480\ \text{м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

58. Вычислите среднюю кинетическую энергию молекул идеального газа при температуре 27°C.

Решение

Средняя кинетическая энергия E теплового движения молекул идеального газа связана с абсолютной температурой T газа уравнением

$$E=3/2kT,$$

где k — постоянная Больцмана. Для вычисления средней кинетической энергии молекул температуру газа по шкале Цельсия нужно перевести в температуру по абсолютной шкале:

$$T=t+273,\ T=300\ \text{К}.$$

Подставляя значения температуры и постоянной Больцмана, находим значение средней кинетической энергии молекул идеального газа:

$$E=3/2\cdot 1{,}38\cdot 10^{23}\ \text{Дж}\cdot\text{К}^{-1}\cdot 300\ \text{К}^{-1}\approx 6{,}2\cdot 10^{-21}\ \text{Дж}.$$

59. В баллоне объемом 30 дм^3 находится водород под давлением $5\cdot 10^6$ Па при температуре 27°C. Определите массу газа, считая водород идеальным газом.

Решение

Для решения задачи воспользуемся уравнением состояния идеального газа

$$pV=\frac{m}{M}RT.$$

Из этого уравнения следует

$$m=\frac{pVM}{RT},$$

где M — молярная масса газа; T — его абсолютная температура. Выпишем в СИ значения всех величин и подставим их в расчетную формулу:

$p=5\cdot 10^6$ Па
$V=3\cdot 10^{-2}$ м^3
$M=2\cdot 10^{-3}$ кг$\cdot$моль$^{-1}$
$R=8{,}3$ Дж$\cdot$моль$^{-1}\cdot$К$^{-1}$
$T=300$ К

m — ?

$$m=\frac{5\cdot 10^6\ \text{Па}\cdot 3\cdot 10^{-2}\ \text{м}^3\cdot 2\cdot 10^{-3}\ \text{кг}\cdot\text{моль}^{-1}}{8{,}3\ \text{Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}\cdot 300\ \text{К}}\approx$$

$$\approx 0{,}12\ \text{кг}.$$

60. Какой объем занимает 2 моль идеального газа при условиях, соответствующих условиям в фотосфере Солнца? Температура фотосферы 6000 К, давление $1{,}25 \cdot 10^2$ Па.

Решение

Для решения задачи используем уравнение состояния идеального газа в форме

$$pV = \nu RT.$$

Объем газа из этого уравнения равен $V = \frac{\nu RT}{p}$.

Выпишем численные значения величин в СИ и подставим их в расчетную формулу:

$p = 1{,}25 \cdot 10^2$ Па
$R = 8{,}3$ Дж·моль$^{-1}$·К$^{-1}$
$\nu = 2$ моль
$T = 6000$ К

V—?

$$V = \frac{2\ \text{моль} \cdot 8{,}3\ \text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 6000\ \text{К}}{1{,}25 \cdot 10^2\ \text{Па}} \approx$$

$$\approx 800\ \text{м}^3.$$

61. При температуре 27 °С и давлении 10^5 Па объем воздушного шара, заполненного гелием, равен 500 м^3. Каким будет объем этого шара, если при подъеме в верхние слои атмосферы температура понизится до −33 °С, а давление станет равным $5 \cdot 10^4$ Па? Массу гелия считать постоянной.

Решение

$p_1 = 10^5$ Па
$V_1 = 500$ м^3
$T_1 = 300$ К
$p_2 = 5 \cdot 10^4$ Па
$T_2 = 240$ К
$m_1 = m_2 = m$

V_2—?

Из уравнения состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

следует, что при условии $m = \text{const}$ $\frac{pV}{T} = \text{const}$. Поэтому выполняется равенство

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}.$$

Из него получаем

$$V_2 = \frac{p_1V_1T_2}{T_1p_2}; \quad V_2 = \frac{10^5\ \text{Па} \cdot 500\ \text{м}^3 \cdot 240\ \text{К}}{300\ \text{К} \cdot 5 \cdot 10^4\ \text{Па}} \approx 800\ \text{м}^3.$$

62. Вычислите кинетическую энергию теплового движения всех молекул воздуха в физическом кабинете. Объем кабинета — 140 м^3, давление воздуха — 10^5 Па. Сколько воды можно было бы нагреть от 0 до 100 °С при полном использовании этой энергии?

Решение[1]

$p = 10^5$ Па
$V = 140$ м^3
$\Delta T = 100$ К
$c = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)

U_2—? m — ?

Считая, что свойства воздуха близки к свойствам идеального газа, применим для вычисления кинетической энергии хаотического теплового движения всех его молекул формулу

$$U = N\bar{E}, \qquad U = \nu N_A \frac{3}{2} kT.$$

Используя равенство $N_A k = R$, получим

$$U = 3/2 \nu RT.$$

Так как из уравнения состояния идеального газа следует, что

$$pV = \nu RT,$$

то

$$U = \frac{3}{2} pV; \quad U = \frac{3}{2} \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 140 \text{ м}^3 = 2{,}1 \cdot 10^7 \text{ Дж}.$$

Для вычисления массы нагреваемой воды запишем уравнение теплового баланса

$$Q = cm\Delta T$$

и выразим из него массу m:

$$m = \frac{Q}{c\Delta T}.$$

По условию задачи $Q = U$, поэтому масса нагреваемой воды равна

$$m = \frac{2{,}1 \cdot 10^7 \text{ Дж}}{4{,}2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг·К)} \cdot 100 \text{ К}} = 50 \text{ кг}.$$

63. Как изменится объем пузырька воздуха при всплывании его со дна озера глубиной 20 м к поверхности воды? Температура воды у дна озера и у поверхности одинакова. Атмосферное давление принять равным 10^5 Па.

[1] Для точного решения этой задачи необходимо знать выражения, определяющие внутреннюю энергию двухатомного газа. Такое выражение не дается в школьном курсе, поэтому задача может быть решена лишь приближенно.

Решение

$h_1 = 20$ м
$h_2 = 0$ м
$\rho = 10^3$ кг/м^3
$g = 10$ м/с^2
$T_1 = T_2$
$p_0 = 10^5$ Па

V_2/V_1 — ?

Объем пузырька воздуха при всплывании будет изменяться из-за уменьшения давления. Так как температура воды одинакова у диа озера и у поверхности воды, изменение объема воздуха будет происходить в результате его изотермического расширения. При изотермическом процессе давление и объем газа связаны соотношением $p_1V_1 = p_2V_2 = \text{const}$.

Отсюда $\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$.

Давление p_2 у поверхности воды равно виешиему атмосферному давлению. Давление p_1 на глубине h складывается из внешнего атмосферного давления и давления водяного столба: $p_1 = p_2 + \rho gh$.

Подставляя численные значения величин, получаем $\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_2 + \rho gh}{p_2}$,

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{10^5 \text{ Па} + 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 20 \text{ м}}{10^5 \text{ Па}} = 3.$$

64. По графику процесса, осуществлеиного с идеальным газом (рис. 120), постройте графики этого процесса в координатных осях p, T и V, T. Температура газа в начальном состоянии *1* была равна 250 К.

Решение

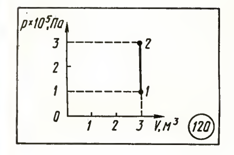
График на рисунке 120 показывает, что давление газа при переходе из состояния *1* в состояние *2* увеличилось в 3 раза, а объем в течение всего процесса оставался неизменным. Следовательно, процесс изменения состояния газа был изохорным. При изохорном процессе связь между давлением газа p и абсолютиой температурой T выражается уравнением $p = p_0\alpha T$.

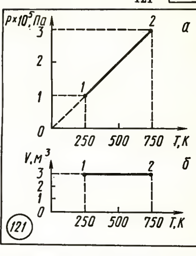
Из этого уравнения следует, что отношение давления газа p к абсолютной температуре T при изохорном процессе является постоянной величиной:

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Отсюда $T_2 = \frac{p_2 T_1}{p_1}$; $\quad T_2 = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 250 \text{ К}}{10^5 \text{ Па}} = 750$ К.

По известным начальным и конечным значениям давления и температуры построим в системе координат с осями p, T точки *1* и *2*, соответствующие начальному и конечному состояниям газа. Зависимость давления p от температуры T линейная,— следователь-





но, график изохорного процесса в координатных осях p, T является прямой, проходящей через точки *1* и *2* (рис. 121, *а*).

В координатных осях V, T график изохорного процесса — это отрезок прямой, параллельной оси абсцисс, с ординатой, равной объему газа. Концы отрезка определяются прямыми, параллельными оси ординат и проходящими через точки на оси абсцисс, соответствующие значениям начальной и конечной температуры (рис. 121, *б*).

65. Каким должен быть радиус капиллярной трубки для того, чтобы при полном смачивании вода в капилляре поднялась на 10 см? Коэффициент поверхностного натяжения воды равен $7\cdot10^{-2}$ Н/м.

$h=10^{-1}$ м
$\sigma=7\cdot10^{-2}$ Н/м
$\rho=10^3$ кг/м³
$g=10$ м/с²

r — ?

Решение

При полном смачивании модуль силы поверхностного натяжения, действующей по линии соприкосновения жидкости со стенкой капилляра, равен модулю силы тяжести поднявшегося столба жидкости:

$$2\pi r\sigma = mg,\quad 2\pi r\sigma = \rho h\pi r^2 g.$$

Из этого равенства следует

$$r=\frac{2\sigma}{\rho g h};\qquad r=\frac{2\cdot7\cdot10^{-2}\ \text{Н/м}}{10^3\ \text{кг/м}^3\cdot10\ \text{м/с}^2\cdot10^{-1}\ \text{м}} = 1{,}4\cdot10^{-4}\ \text{м}.$$

66. Какой диаметр должен иметь стальной трос подъемного крана, если максимальная масса поднимаемого груза равна 10 т? Предел прочности стальной проволоки $8{,}5\cdot10^8$ Па, запас прочности должен быть равен 6.

Решение

$m = 10^4$ кг
$\sigma_{пч} = 8{,}5 \cdot 10^8$ Па
$n = 6$

D — ?

Предел прочности определяется отношением модуля максимальной силы упругости к площади поперечного сечения:

$$\sigma_{пч} = \frac{F_y}{S}.$$

Так как запас прочности равен 6, трос должен выдерживать нагрузку, в 6 раз превышающую ту, которая возникает при подъеме груза массой 10 т. Следовательно,

$$\sigma_{пч} = \frac{6mg}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{24mg}{\pi D^2}.$$

Отсюда диаметр троса равен

$$D = \sqrt{\frac{24mg}{\pi\sigma_{пч}}};\quad D = \sqrt{\frac{24 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2}{3{,}14 \cdot 8{,}5 \cdot 10^8 \text{ Па}}} \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

67. Вычислите работу совершаемую одним молем идеального газа при изобарном нагревании на 1 К.

Решение

$p_1 = p_2 = p$
$\Delta T = 1$ К
$\nu = 1$ моль

A — ?

При изобарном нагревании идеального газа работа A', совершаемая газом, равна

$$A' = p\Delta V.$$

Так как по условию задачи не даны значения давления p газа и изменения его объема ΔV, выразим эти величины через известное изменение ΔT температуры газа. Для этого воспользуемся уравнением состояния идеального газа

$$pV_1 = \nu RT_1, \qquad pV_2 = \nu RT_2.$$

Из этих уравнений получаем

$$p(V_2 - V_1) = \nu R(T_2 - T_1), \text{ или } p\Delta V = \nu R\Delta T.$$

Отсюда для работы газа при изобарном нагревании будем иметь

$$A' = \nu R\Delta T;$$

$$A' = 1 \text{ моль} \cdot 8{,}3 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} \cdot 1 \text{ К} = 8{,}31 \text{ Дж}.$$

Таким образом, молярная газовая постоянная R равна работе, совершаемой одним молем идеального газа при изобарном нагревании на 1 К.

68. Определите максимальный КПД тепловой машины, если температура нагревателя равна 227 °С, а температура холодильника — 27 °С.

Решение

$T_1 = 500$ К
$T_2 = 300$ К
η_{max} — ?

Максимальный КПД тепловой машины определяется выражением

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}; \qquad \eta_{max} = \frac{500\ К - 300\ К}{500\ К} = 0{,}4.$$

69. Карбюраторный двигатель внутреннего сгорания работает по циклу, состоящему из четырех последовательно происходящих процессов: адиабатного сжатия из состояния A в состояние B, изохорного перехода из состояния B в состояние C в результате нагревания воздуха при сжигании горючей смеси, адиабатного расширения из состояния C в состояние D и изохорного перехода из состояния D в исходное состояние A (см. рис. 117). Вычислите КПД двигателя для случая, если бы воздух был идеальным одноатомным газом при значениях температуры в состояниях A, B, C и D соответственно $T_A = 300$ К, $T_B = 524$ К, $T_C = 786$ К и $T_D = 450$ К.

Решение

Значение КПД теплового двигателя определяется уравнением

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 — количество теплоты, переданное за цикл рабочему телу от нагревателя; Q_2 — количество теплоты, полученное за цикл холодильником от рабочего тела.

Во время осуществления адиабатических процессов расширения и сжатия нет теплообмена рабочего тела ни с холодильником, ни с нагревателем. Следовательно, весь процесс теплоотдачи количества теплоты Q_1 от нагревателя осуществляется при переходе газа из состояния B в состояние C, а процесс передачи количества теплоты Q_2 холодильнику — при переходе газа из состояния D в состояние A. При изохорическом переходе газа из состояния B в состояние C работа внешних сил равна нулю: $A = 0$, так как поршень неподвижен. Из первого закона термодинамики для этого процесса следует

$$\Delta U_{BC} = Q_1 + A, \ A = 0, \ \Delta U_{BC} = Q_1.$$

Мы получили, что количество теплоты, полученное газом от нагревателя за весь цикл, равно изменению внутренней энергии газа при переходе из состояния B в состояние C:

$$Q_1 = \Delta U_{BC} = U_C - U_B = \frac{3}{2}\frac{m}{M} RT_C - \frac{3}{2}\frac{m}{M} RT_B = \frac{3}{2}\frac{m}{M}(T_C - T_B).$$

Аналогично количество теплоты Q_2, переданное холодильнику при изохорическом переходе газа из состояния D в состояние A, равно

$$Q_2 = \Delta U_{DA} = U_D - U_A = \frac{3}{2}\frac{m}{M} R (T_D - T_A).$$

Подставляя полученные выражения для Q_1 и Q_2 в уравнение для определения КПД, получаем

$$\eta=\frac{Q_1-Q_2}{Q_1}=\frac{\frac{3}{2}\frac{m}{M}R(T_C-T_B)-\frac{3}{2}\frac{m}{M}R(T_D-T_A)}{\frac{3}{2}\frac{m}{M}R(T_C-T_B)}=\frac{T_C-T_B-T_D+T_A}{T_C-T_B}.$$

Найдем численное значение КПД:

$$\eta=\frac{786\ \text{К}-524\ \text{К}-450\ \text{К}+300\ \text{К}}{786\ \text{К}-524\ \text{К}}\approx 0{,}43.$$

70. В теплоизолированном сосуде находятся вода и лед при температуре 0 °С. Массы воды и льда соответственно равны 0,5 кг и 60 г. В воду впускается водяной пар массой 10 г при температуре 100 °С. Какой станет температура воды в сосуде после установления теплового равновесия? Теплоемкость сосуда в расчетах не учитывать.

Решение

$m_1=0{,}5$ кг
$m_2=6\cdot10^{-2}$ кг
$m_3=10^{-2}$ кг
$T_1=273$ К
$T_2=373$ К
$r=2{,}26\cdot10^6$ Дж/кг
$\lambda=3{,}3\cdot10^5$ Дж/кг
$c=4{,}2\cdot10^3$ Дж/(кг·К)

T_3 — ?

Проверим сначала, достаточно ли выделяющегося при конденсации пара количества теплоты Q_3 для плавления льда.

При конденсации пара выделяется количество теплоты Q_3:

$$Q_3=-rm_3.$$

Для плавления льда требуется количество теплоты Q_2:

$$Q_2=\lambda m_2;$$

$$Q_2=6\cdot10^{-2}\ \text{кг}\cdot3{,}3\cdot10^5\ \text{Дж/кг}\approx2\cdot10^4\ \text{Дж};$$

$$Q_3=2{,}26\cdot10^6\ \text{Дж/кг}\cdot10^{-2}\ \text{кг}=2{,}26\cdot10^4\ \text{Дж}.$$

Сравнение количеств теплоты Q_3 и Q_2 показывает, что $Q_3>Q_2$, поэтому уравнение теплового баланса имеет вид

$$rm_3+cm_3(T_2-T_3)=\lambda m_2+c(m_1+m_2)(T_3-T_1).$$

Теплота выделяется при конденсации пара массой m_3 и остывании сконденсировавшейся воды от температуры T_2 до некоторого значения T_3, а поглощается при плавлении льда массой m_2 и нагревании воды массой (m_1+m_2) от температуры T_1 до равновесного значения T_3. Обозначив $T_3-T_1=\Delta T$, для разности T_2-T_3 получим

$$T_2-T_3=T_2-T_1-\Delta T=100-\Delta T.$$

Уравнение теплового баланса приобретает вид

$$rm_3+cm_3(100-\Delta T)=c(m_1+m_2)\Delta T+\lambda m_2;$$

$$c(m_1+m_2+m_3)\Delta T=rm_3+cm_3100-\lambda m_2.$$

Откуда

$$\Delta T = \frac{rm_3 + cm_3 100 - \lambda m_2}{c\,(m_1 + m_2 + m_3)};$$

$$\Delta T \approx \frac{2{,}26\cdot 10^6\cdot 10^{-2} + 4{,}2\cdot 10^3\cdot 10^{-2}\cdot 10^2 - 3{,}3\cdot 10^5\cdot 6\cdot 10^{-2}}{4{,}2\cdot 10^3\cdot 5{,}7\cdot 10^{-1}}\ \text{К} \approx 3\ \text{К}.$$

Тогда $T_2 = 273$ К $+ 3$ К $= 276$ К.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

71. Считая водород в солнечной фотосфере внешней видимой оболочки Солнца идеальным газом, определите среднюю кинетическую энергию атомов водорода. Концентрация атомов водорода в фотосфере равна примерно $1{,}6\cdot 10^{21}$ $м^{-3}$, давление равно примерно $1{,}25\cdot 10^2$ Па.

72. Масса молекулы водорода равна $3{,}3\cdot 10^{-27}$ кг. Считая водород идеальным газом, вычислите его давление на стенки сосуда при концентрации 10^{25} $м^{-3}$ и средней квадратичной скорости молекул 700 м/с.

73. В межзвездном пространстве содержится ~ 1 атом водорода в 1 $см^3$, температура газа 125 К. Определите давление межзвездного газа.

74. При какой температуре средняя кинетическая энергия теплового движения молекулы идеального газа будет равна кинетической энергии, которую приобретает копеечная монета, падающая с высоты 1 м?

75. Считая воздух идеальным газом, вычислите концентрацию молекул в нем при нормальных условиях.

76. Под каким давлением находится углекислый газ в баллоне огнетушителя емкостью 2 $дм^3$, если баллон до заполнения имел массу 4,2 кг, а после заполнения — 5,6 кг? Температура баллона 37 °С.

77. Плотность неона в баллоне неоновой лампы 0,05 $кг/м^3$ при давлении $5\cdot 10^3$ Па. Определите температуру неона.

78. Суточное потребление кислорода человеком примерно равно 1 кг. В комнате какого объема в воздухе при нормальных условиях содержится такое количество кислорода? Парциальное давление кислорода 21 кПа.

79. В конце процесса сжатия газа в цилиндре карбюраторного двигателя внутреннего сгорания давление было $9\cdot 10^5$ Па, в конце процесса сгорания топлива стало равным $35\cdot 10^5$ Па. Определите температуру газа в цилиндре в конце процесса сгорания топлива. Температура в конце процесса сжатия равна 400 °С. Поршень в процессе сгорания топлива можно считать неподвижным.



80. Вычислите массу насыщенного водяного пара в 1 м^3 воздуха при температуре 20 °С.

81. В воздухе насыщенный водяной пар содержится при 30 °С. Определите массу воды, выпавшей в виде росы, из 1 м^3 воздуха при его охлаждении до 15 °С.

82. Для отрыва кольца диаметром 5 см от поверхности жидкости потребовалось приложить силу 16 мН. Определите по этим данным поверхностное натяжение жидкости.

83. Чему равно абсолютное удлинение стального троса длиной 100 м с площадью поперечного сечения 2 см^2 при подвешивании на него груза массой 2 т? Модуль упругости стали $2 \cdot 10^{11}$ Па.

84. К алюминиевой проволоке длиной 2 м и площадью поперечного сечения 4 мм^2 подвесили груз, под действием которого она удлинилась на 1 мм. Определите силу упругости, возникшую в проволоке. Модуль упругости алюминия $0{,}71 \cdot 10^{11}$ Па.

85. Найдите максимальное значение высоты здания из кирпича, если предел прочности кирпича на сжатие $1{,}5 \cdot 10^7$ Па, плотность кирпича $1{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3, а необходимый запас прочности равен 6.

86. В результате получения количества теплоты 800 Дж воздух в цилиндре расширился и совершил работу 200 Дж. Как изменилась при этом внутренняя энергия воздуха?

87. Какое количество теплоты нужно передать идеальному газу в цилиндре под поршнем, для того чтобы внутренняя энергия газа увеличилась на 100 Дж и при этом газ совершил работу 200 Дж?

88. При каком минимальном значении скорости свинцовая пуля при ударе о стенку может полностью расплавиться? Начальная температура пули 27 °С.

89. В теплоизолированном сосуде содержится смесь 1 кг воды и 100 г льда при температуре 0 °С. В сосуд вводят 5 г пара при температуре 100 °С. Какой будет температура в сосуде после установления теплового равновесия? Теплоемкость сосуда не учитывать.

90. В калориметре находится 0,5 кг воды при температуре 10 °С. В воду положили 1 кг льда при температуре —30 °С. Какая температура установится в калориметре, если его теплоемкостью можно пренебречь?

91. Тепловая машина за цикл совершает работу 500 Дж и получает от нагревателя количество теплоты 1500 Дж. Вычислите КПД машины.

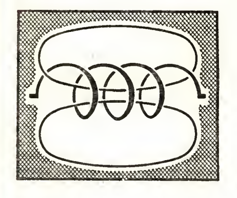
92. Тепловая машина с КПД 25% получает от нагревателя 800 Дж. Какую полезную работу она совершает?

93. Тепловая машина получает за цикл от нагревателя 800 Дж и отдает холодильнику 600 Дж. Вычислите КПД машины.

94. Вычислите максимальное значение КПД тепловой машины с температурой нагревателя 427 °С и температурой холодильника 27 °С.

95. Какой должна быть температура нагревателя, для того чтобы стало возможным достижение максимального значения КПД тепловой машины 80% при температуре холодильника 300 К?

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА



36. Закон сохранения электрического заряда 128
37. Закон Кулона 131
38. Электрическое поле . . . 132
39. Работа при перемещении электрического заряда в электрическом поле . . . 136
40. Потенциал 137
41. Вещество в электрическом поле 140
42. Электроемкость 143
43. Закон Ома 146
44. Электрический ток в металлах 151
45. Электрический ток в полупроводниках 153
46. Полупроводниковые приборы 156
47. Электрический ток в электролитах 163
48. Открытие электрона . . 165
49. Электрический ток в газах . 167
50. Электрический ток в вакууме 172
51. Магнитное поле 176
52. Сила Лоренца 180
53. Вещество в магнитном поле 183
54. Электромагнитная индукция 186
55. Самоиндукция 190
56. Магнитная запись информации 192
57. Машина постоянного тока . 195
58. Электроизмерительные приборы 200

Примеры решения задач . . 201
Задачи для самостоятельного решения 211

36. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

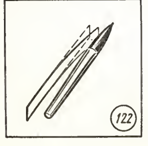
Электрические заряды. Не все явления в природе можно понять и объяснить на основе использования понятий и законов механики, молекулярно-кинетической теории строения вещества и термодинамики. Достаточно обратить внимание на тот факт, что ни механика, ни молекулярно-кинетическая теория, ни термодинамика ничего не говорят о природе сил, которые связывают отдельные атомы в молекулы, удерживают атомы и молекулы вещества в твердом состоянии на определенных расстояниях друг от друга. Законы взаимодействия атомов и молекул удается понять и объяснить на основе представления о том, что в природе существуют *электрические заряды*.

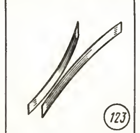
Самое простое и повседневное явление, в котором обнаруживается факт существования в природе электрических зарядов,— это электризация тел при соприкосновении.

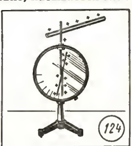
Отрежем от тетрадного листа полоску бумаги шириной 1 см. Положив полоску на тетрадь, проведем по ней несколько раз пластмассовой ручкой с легким нажимом. Затем возьмем полоску в одну руку, а ручку в другую и будем их сближать. Бумажная полоска изгибается в сторону ручки, т. е. между ними возникают силы притяжения (рис. 122).

Положим две бумажные полоски рядом на тетрадь, проведем по ним ручкой несколько раз с легким нажимом. Взяв полоски в руки, будем сближать их. Опыт показывает, что при сближении полоски изгибаются в противоположные стороны, обнаруживая существование сил отталкивания (рис. 123).

Взаимодействие тел, обнаруженное в этих опытах, называется *электромагнитным* взаимодействием. Физическая величина, определяющая электромагнитное взаимодействие, называется *элек-*


122


123


124

трическим зарядом. Электрический заряд обозначается буквой q.

Способность электрическнх зарядов как к взаимному прнтяжению, так н к взаимиому отталкиваиию объясняется предположением о существовании двух различиых видов зарядов. Один вид электрического заряда назвали положительным, а другой — отрицательиым.

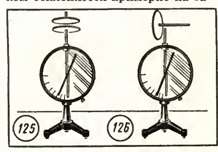
Очевндио, что при соприкосиовении с пластмассовой ручкой на двух одинаковых полосках бумаги появляются электрическне заряды одного знака. Эти полоски отталкиваются,— следовательио, между электрическими зарядамн одного знака действуют силы отталкиваиия. Между электрнческими зарядамн разиого знака действуют силы прнтяжеиия.

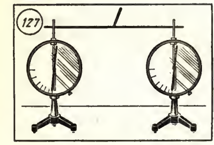
Электрометр. Для обнаружения и измереиия электрических зарядов прнмеияется *электрометр,* состоящий нз металлического стержия и стрелки, которая может вращаться вокруг горизонтальиой осн. Стержень со стрелкой закреплен в плексигласовой втулке и помещен в металлическнй корпус цилиндрической формы, закрытый стекляиными крышками. Натнраием о мех илн бумагу сообщим электрнческий заряд эбонитовой палочке, а затем прикосиемся палочкой к стержию электрометра. При сопрнкосновении заряжеиного тела со стержнем электрометра электрическне заряды распределяются по стержню и стрелке. Силы отталкивания, действующие между одноименными зарядами на стержие и стрелке, вызывают поворот стрелки (рис. 124).

Наэлектрнзуем эбоиитовую палочку еще раз и вновь коснемся ею стержия электрометра. Опыт показывает, что при увеличеиии электрического заряда иа стержне угол отклоиения стрелки от вертикального положения увеличивается. Следовательио, по углу отклонения стрелкн электрометра можно судить о значении электрического заряда, передаиного стержню электрометра.

Закон сохранения электрического заряда. Установим иа демоистрационном столе два одинаковых электрометра. На стержне первого из иих укрепим металлический диск и поставим иа иего второй такой же диск с ручкой из нзолятора. Между днскамн поместим прослойку из сукна или другого материала, являющегося изолятором. Взявшись за ручку, совершим несколько движеннй верхним диском по прослойке и поднимем этот диск (рис. 125).

После удалеиия верхиего диска стрелка первого электрометра отклонится, обнаружнвая появление электрнческого заряда иа диске и стержне электрометра. Опыт показывает, что стрелка второго электрометра после прикосновения к стержню вторым диском отклоияется примерно на та-





кой же угол, на какой отклонилась стрелка первого электрометра (рис. 126). Это значит, что в результате электризации при соприкосновении электрические заряды появились одновременно на двух соприкасавшихся телах: на первом диске с сукном и на втором диске.

Теперь выполним последнюю часть опыта: соединим проводником стержни первого и второго электрометров (рис. 127). При этом стрелки обоих электрометров возвращаются в вертикальное положение. Наблюдаемая в опыте взаимная нейтрализация зарядов показывает, что суммарный электрический заряд на двух дисках равен нулю.

Аналогичные опыты, выполненные с различными телами и с применением самых точных приборов для измерения электрических зарядов, показали, что в результате электризации при соприкосновении на телах всегда возникают электрические заряды, равные по модулю и противоположные по знаку.

Электрические заряды могут появляться на телах не только в результате электризации при соприкосновении тел, но и при других взаимодействиях, например под действием света. Однако **в замкнутой системе, в которую не входят извне электрические заряды и из которой не выходят заряды, при любых взаимодействиях тел алгебраическая сумма электрических зарядов всех тел остается постоянной:**

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}. \quad (36.1)$$

Этот экспериментально установленный факт называется *законом сохранения электрического заряда.*

Нигде и никогда в природе не возникает и не исчезает электрический заряд одного знака.

Появление положительного электрического заряда $+q$ всегда сопровождается появлением равного по абсолютному значению отрицательного электрического заряда $-q$. Ни положительный, ни отрицательный заряд не могут исчезнуть в отдельности один от другого, они могут лишь взаимно нейтрализовать друг друга, если равны по абсолютному значению.

Появление и исчезновение электрических зарядов на телах в большинстве случаев объясняется переходами элементарных заряженных частиц — электронов — от одних тел к другим. Как известно, в состав любого атома входят положительно заряженное ядро и отрицательно заряженные электроны. В нейтральном атоме суммарный заряд электронов в точности равен заряду атомного ядра. Тело, состоящее из нейтральных атомов и молекул, имеет суммарный электрический заряд, равный нулю.

Если в результате какого-либо взаимодействия часть электронов переходит от одного тела к другому, то одно тело получает отрицательный электрический заряд $-q$, а второе — равный по модулю положительный электрический заряд $+q$.

При соприкосновении двух разноименно заряженных тел обычно электрические заряды не исчезают бесследно, а избыточное число электронов переходит с отрицательно заряженного тела к телу, у которого часть атомов имела не полный комплект электронов на своих оболочках.

Особый случай представляет встреча заряженных античастиц, например электрона и позитрона. В этом случае положительный и отрицательный электрические заряды действительно исчезают, но в полном соответствии с законом сохранения электрического заряда, так как алгебраическая сумма зарядов электрона и позитрона равна нулю.

37. ЗАКОН КУЛОНА

Закон Кулона. Законы взаимодействия неподвижных электрических зарядов изучает *электростатика*. Основной закон электростатики был экспериментально установлен французским физиком Шарлем Кулоном (1736—1806) в 1785 г. В опытах Кулона измерялись силы взаимодействия заряженных шаров. Опыты показали, что модуль силы $\vec{F}_э$ взаимодействия двух точечных неподвижных заряженных тел прямо пропорционален произведению абсолютных значений зарядов q_1 и q_2 и обратно пропорционален квадрату расстояния r между телами:

$$F_э = k\frac{|q_1|\ |q_2|}{r^2}. \qquad (37.1)$$

Сила $\vec{F}_э$ направлена вдоль прямой, соединяющей заряженные тела. Она является силой отталкивания при одинаковых знаках зарядов q_1 и q_2 и силой притяжения при разных знаках.

Взаимодействие неподвижных электрических зарядов называют *электростатическим* или *кулоновским* взаимодействием.

Единица электрического заряда. В международной системе за единицу заряда принят *кулон* (Кл).

Кулон — это заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А. Определение единицы силы тока 1 А будет дано в § 51.

Электрическая постоянная. Коэффициент пропорциональности k в выражении закона Кулона в системе СИ равен

$$k = 9\cdot 10^9\ Н\cdot м^2/Кл^2. \qquad (37.2)$$

Вместо коэффициента k часто используется коэффициент, называемый *электрической постоянной*. Электрическая постоянная ε_0 связана с коэффициентом k выражением

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}. \qquad (37.3)$$

Отсюда следует $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$;

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\cdot 3,14\cdot 9\cdot 10^9}\,\frac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2} \approx$$

$$\approx 8,85\cdot 10^{-12}\,\frac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}.$$

С использованием электрической постоянной закон Кулона имеет вид

$$F_э = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{|q_1|\;|q_2|}{r^2}. \quad (37.4)$$

38. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Электрическое поле. Взаимодействие зарядов по закону Кулона является экспериментально установленным фактом. Однако математическое выражение закона взаимодействия зарядов не раскрывает физической картины самого процесса взаимодействия, не отвечает на вопрос, каким путем осуществляется действие заряда q_1 на заряд q_2.

Возможный ответ на этот вопрос давала *теория дальнодействия,* которая утверждала, что электрические заряды обладают способностью мгновенно действовать друг на друга на расстоянии.

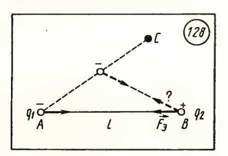
Теория близкодействия, созданная на основе работ английского физика Майкла Фарадея (1791—1867), объясняет взаимодействие электрических зарядов тем, что вокруг каждого электрического заряда существует *электрическое поле.* Электрическое поле заряда — материальный объект, оно непрерывно в пространстве и способно действовать на другие электрические заряды.

Согласно представлениям теории близкодействия, взаимодействие электрических зарядов q_1 и q_2 есть результат действия поля заряда q_1 на заряд q_2 и поля заряда q_2 на заряд q_1.

Количественное выражение электростатического взаимодействия в теории дальнодействия и в теории близкодействия имеет один и тот же вид (закон Кулона). Поэтому на основе изучения законов электростатики нельзя сделать обоснованный выбор между этими двумя теориями.

Тот факт, что электрическое поле объективно существует, что оно материально, доказывается опытами с ускоренно движущимися электрическими зарядами.

Пока электрические заряды q_1 и q_2 неподвижны и находятся в точках A и B, на заряд q_2 со стороны заряда q_1 действует сила $\vec{F}_э$, направленная вдоль прямой AB (рис. 128). Если в некоторый момент времени t заряд q_1 начинает двигаться из



точки A к точке C, модуль и направление силы $\vec{F}_э$, действующей на заряд q_2, должны измениться. Согласно представлениям теории дальнодействия, эти изменения должны происходить мгновенно, т. е. в любой момент времени сила $\vec{F}_э$ должна быть направлена вдоль прямой, соединяющей заряды, и модуль силы $\vec{F}_э$ должен определяться по закону Кулона.

Однако в действительности наблюдается другая картина. Если в некоторый момент времени t заряд q_1 выходит из состояния покоя и движется ускоренно, то изменение силы $\vec{F}_э$, действующей со стороны заряда q_1 на заряд q_2, наблюдается лишь через интервал времени Δt, определяемый выражением

$$\Delta t = \frac{l}{c},$$

где l — расстояние между зарядами, c — скорость света, равная 300 000 км/с. Запаздывание изменений взаимодействия электрических зарядов при их ускоренном движении доказывает справедливость теории близкодействия, т. е. существование электрического поля как материального объекта, способного действовать на электрические заряды. Скорость света c есть скорость распространения изменений, возникающих в электрическом поле при ускоренном движении электрических зарядов.

Запаздывание изменений в электрическом поле на расстояниях в несколько метров обнаружить довольно трудно из-за большой скорости их распространения. А в космонавтике эти запаздывания не только легко обнаружимы, но и создают определенные трудности в управлении космическими аппаратами.

Например, команды, отправленные антеннами радиопередатчиков с пункта космической связи, достигали приемных антенн лунохода лишь через 1,3 с после их отправления, так как расстояние от Земли до Луны составляет примерно 400 тыс. км. При осуществлении посадки на поверхность планеты Венера автоматические космические станции «Венера» получали команды с Земли спустя 3,5 мин после их отправления, так как расстояние между Землей и Венерой при этом превышало 60 млн. км.

Напряженность электрического поля. Физическая величина, равная отношению силы, с которой электрическое поле действует на точечный электрический заряд, к значению этого заряда, называется *напряженностью электрического поля*. Обозначив напряженность буквой $\vec{E}$, запишем

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_э}{q_1}, \qquad (38.1)$$

где q_1 — заряд, на который действует сила $\vec{F}_э$.

Используя закон Кулона и определение понятия напряженности поля, получим выражение для модуля напряженности $\vec{E}$ электрического поля в некоторой точке A на расстоянии r от точечного заряда q. Если в точку A поместить точечный заряд q_1, то на него будет действовать сила, по закону Кулона равная

$$\vec{F}_э = k\frac{|q|\,|q_1|}{r^2}.$$

Для нахождения модуля напряженности электрического поля в точке A разделим модуль силы $\vec{F}_э$ на модуль заряда q_1:

$$E=\frac{F_э}{|q_1|}=k\frac{|q|\,|q_1|}{|q_1|r^2}=k\frac{|q|}{r^2},$$

$$E=k\frac{|q|}{r^2}. \qquad (38.2)$$

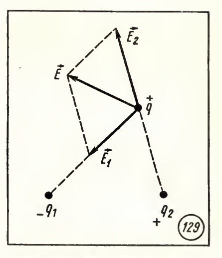
Напряженность электрического поля точечного заряда прямо пропорциональна заряду q и обратно пропорциональна квадрату расстояния r от заряда до данной точки поля. Она не зависит от заряда q_1, помещенного в данную точку поля, следовательно, является однозначной силовой характеристикой поля в данной точке.

Напряженность электрического поля — векторная величина. За направление вектора $\vec{E}$ напряженности электрического поля принимается направление вектора кулоновской силы $\vec{F}_э$, действующей на точечный положительный электрический заряд, помещенный в данную точку поля.

Зная напряженность электрического поля $\vec{E}$ в данной точке поля, можно определить модуль и направление силы $\vec{F}_э$, с которой электрическое поле будет действовать на любой электрический заряд q в этой точке:

$$\vec{F}_э=q\vec{E}. \qquad (38.3)$$

Опыт показывает, что если на электрический заряд q действуют одновременно электрические поля нескольких зарядов, то результирующая сила оказывается равной



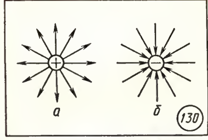
геометрической сумме сил, действующих со стороны каждого поля в отдельности. Это свойство электрических полей означает, что поля подчиняются *принципу суперпозиции:* если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля с напряженностями $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ и т. д., то **вектор напряженности электрического поля равен сумме векторов напряженностей всех электрических полей** (рис. 129):

$$\vec{E}=\vec{E}_1+\vec{E}_2+\ldots\,. \qquad (38.4)$$

Линии напряженности электрического поля. *Линией напряженности электрического поля* называется линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с вектором напряженности $\vec{E}$.

Линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных электрических зарядах и кончаются на отрицательных электрических зарядах или уходят в бесконечность.





Распределение линий напряженности вокруг точечного заряда показано на рисунке 130, *а*, *б*.

Определяя направление вектора $\vec{E}$ в различных точках пространства, можно представить картину распределения линий напряженности электрического поля. Для двух одноименных зарядов эта картина имеет вид, показанный на рисунке 131, для разноименных — на рисунке 132.

Однородное электрическое поле. Электрическое поле, в котором напряженность одинакова по модулю и направлению в любой точке пространства, называется *однородным* электрическим полем.

Приблизительно однородным является электрическое поле между двумя разноименно заряженными плоскими металлическими пластинами. Линии напряженности в однородном электрическом поле параллельны друг другу (рис. 133).

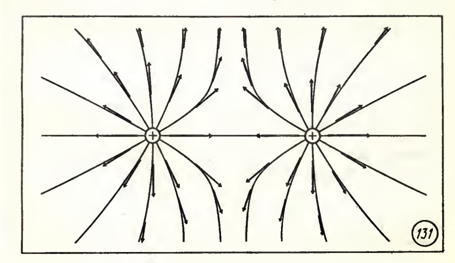
При равномерном распределении электрического заряда q по поверхности площади S поверхностная плотность заряда σ постоянна и равна

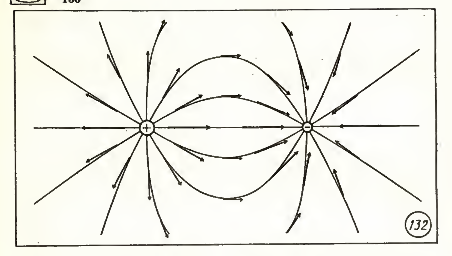
$$\sigma=\frac{q}{S}. \qquad (38.5)$$

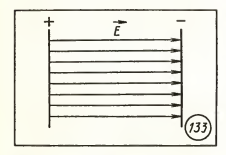
Можно доказать, что напряженность электрического поля бесконечной плоскости с поверхностной плотностью заряда σ одинакова в любой точке пространства и равна

$$E=k2|\sigma|\pi=\frac{|\sigma|}{2\varepsilon_0}. \qquad (38.6)$$

Формула (38.6) применяется для расчетов напряженности электрического поля около заря-







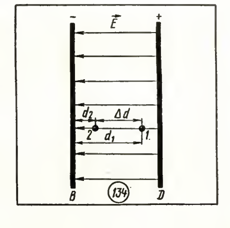
женных тел в том случае, когда форма равномерно заряженной поверхности близка к плоскости и расстояние от точки, в которой определяется напряженность поля, до поверхности тела значительно меньше размеров тела и расстояния до края заряженной поверхности.

39. РАБОТА ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Вычислим работу при перемещении электрического заряда в однородном электрическом поле с напряженностью $\vec{E}$. Если перемещение заряда происходило по линии напряженности поля на расстояние $\Delta d = d_1 - d_2$ (рис. 134), то работа равна

$$A = F_э(d_1 - d_2) = qE(d_1 - d_2), \quad (39.1)$$

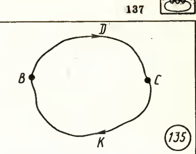
где d_1 и d_2 — расстояния от начальной и конечной точек до пластины *B*.



В механике было показано, что при перемещении между двумя точками в гравитационном поле работа силы тяжести не зависит от траектории движения тела. Силы гравитационного и электростатического взаимодействия имеют одинаковую зависимость от расстояния, векторы сил направлены вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие точечные тела. Отсюда следует, что и при перемещении заряда в электрическом поле из одной точки в другую работа сил электрического поля не зависит от траектории его движения.

Этот вывод подтверждается самыми точными экспериментами.

При изменении направления перемещения на 180° работа сил электрического поля, как и работа силы тяжести, изменяет знак на противоположный. Если при перемещении заряда q из точки B в точку C силы электрического поля совершили работу A, то при перемещении заряда q по тому же самому пути из точки C в точку B они совершают работу $-A$. Но так как работа не зависит от траектории, то и при перемещении по траектории CKB тоже совершается работа $-A$. Отсюда следует, что при перемещении заряда сначала из точки B в точку C, а затем из точки C в точку B, т. е. по замкнутой траектории, суммарная работа сил электростатического поля оказывается равной нулю (рис. 135).



Работа сил электростатического поля при движении электрического заряда по любой замкнутой траектории равна нулю.

Поле, работа сил которого по любой замкнутой траектории равна нулю, называется *потенциальным* полем. Гравитационное и электростатическое поля являются потенциальными полями.

40. ПОТЕНЦИАЛ

Потенциальная энергия заряда в электрическом поле. Продолжим сравнение гравитационного взаимодействия тел и электростатического взаимодействия зарядов. Тело массой m в поле тяжести Земли обладает потенциальной энергией.

Работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}) = mgh.$$

(Здесь и далее мы будем обозначать энергию буквой W.)

Точно так же, как тело массой m в поле силы тяжести обладает потенциальной энергией, пропорциональной массе тела,

электрический заряд в электростатическом поле обладает потенциальной энергией W_p, пропорциональной заряду q. Работа сил электростатического поля A равна изменению потенциальной энергии заряда в электрическом поле, взятому с противоположным знаком:

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}). \quad (40.1)$$

Потенциал. В одной точке электростатического поля разные заряды могут обладать различной потенциальной энергией, но отношение потенциальной энергии W_p к заряду q для данной точки поля оказывается постоянной величиной. Эту величину принимают за энергетическую характеристику данной точки поля.

Физическая величина, равная отношению потенциальной энергии электрического заряда в электрическом поле к заряду, называется *потенциалом* φ *электрического поля:*

$$\varphi = \frac{W_p}{q}. \quad (40.2)$$

Отсюда потенциальная энергия W_p заряда в электростатическом поле равна произведению заряда q на потенциал φ электрического поля в данной точке:

$$W_p = q\varphi. \quad (40.3)$$

Значение потенциальной энергии электрического заряда в данной точке электрического поля определяется не только характеристиками электрического поля, но и знаком заряда, помещенного в данную точку поля, и выбором нулевого уровня отсчета потенциальной энергии.

Потенциал — величина скалярная. Если в некоторой точке пространства двумя зарядами одновременно созданы электрические поля с потенциалами φ_1 и φ_2, то потенциал φ двух электрических полей равен алгебраической сумме потенциалов φ_1 и φ_2:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2. \quad (40.4)$$

Аналогичным способом можно найти потенциал электрического поля, созданного любым числом электрических зарядов.

Разность потенциалов. Мерой изменения энергии при взаимодействиях тел является работа. Мы выяснили, что при перемещении электрического заряда q работа A сил электростатического поля равна изменению потенциальной энергии ΔW_p заряда, взятому с противоположным знаком, поэтому из выражений (40.1) и (40.3) получаем

$$A = q\varphi_1 - q\varphi_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (40.5)$$

При перемещении электрического заряда в электростатическом поле работа сил поля равна произведению заряда на разность потенциалов начальной и конечной точек траектории движения заряда.

Так как работа сил электростатического поля при перемещении заряда из одной точки пространства в другую не зависит от траектории движения заряда между этими точками, то разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ двух точек электрического поля является величиной, не зависящей от траектории движения заряда. Разность потенциалов, следовательно, может служить энергети-

ческой характеристикой электростатического поля.

Если потенциал поля на бесконечно большом расстоянии от точечного электрического заряда в вакууме принимается равным нулю, то на расстоянии r от заряда он определяется по формуле

$$\varphi = k\frac{q}{r}. \qquad (40.6)$$

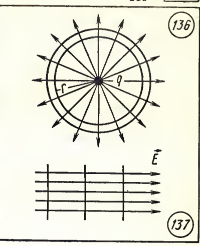
Эквипотенциальные поверхности. Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется *эквипотенциальной поверхностью*.

Между двумя любыми точками на эквипотенциальной поверхности разность потенциалов равна нулю, поэтому работа сил электрического поля при любом перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю. Это означает, что вектор силы $\vec{F}_э$ в любой точке траектории движения заряда по эквипотенциальной поверхности перпендикулярен вектору скорости. Следовательно, линии напряженности электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальной поверхности.

Эквипотенциальными поверхностями поля точечного электрического заряда являются сферы, в центре которых расположен заряд (рис. 136).

Эквипотенциальные поверхности однородного электрического поля представляют собой плоскости, перпендикулярные линиям напряженности (рис. 137).

Напряжение. Отношение работы, совершаемой любым электрическим полем при перемещении положительного заряда из одной точки поля в другую, к значению заряда называется *напряжением* между этими точками:



$$U = \frac{A}{q}. \qquad (40.7)$$

Отсюда работа сил электрического поля при перемещении заряда равна произведению напряжения U между точками на заряд q:

$$A = qU. \qquad (40.8)$$

В электростатическом поле напряжение между двумя любыми точками равно разности потенциалов этих точек:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2. \qquad (40.9)$$

Как будет показано далее, равенство (40.9) может не выполняться, если электрическое поле непотенциальное. В непотенциальных электрических полях работа сил поля при перемещении электрического заряда зависит от траектории движения заряда из одной точки в другую.

Единица напряжения и разности потенциалов. Единица напряжения и разности потенциалов в СИ называется *вольтом* (В):

$$U=\frac{A}{q}, \quad 1\ \text{В}=\frac{1\ \text{Дж}}{1\ \text{Кл}}.$$

Связь напряжения с напряженностью поля. При перемещении положительного заряда q по линии напряженности однородного поля на расстояние d кулоновская сила $\vec{F}_э$ совершает работу, равную

$$A=F_э d=qEd.$$

С другой стороны, работа электрического поля может быть найдена по известному напряжению U между начальной и конечной точками пути:

$$A=qU.$$

Следовательно, напряжение U между двумя точками в однородном электрическом поле, расположенными по одной линии напряженности, равно произведению модуля вектора напряженности $\vec{E}$ поля на расстояние d между этими точками:

$$U=Ed. \qquad (40.10)$$

Отсюда для напряженности однородного электрического поля получаем выражение

$$E=\frac{U}{d}. \qquad (40.11)$$

Из соотношения (40.11) следует, что единицей напряженности электрического поля в СИ является *вольт на метр* (В/м):

$$\frac{1\ \text{В}}{1\ \text{м}}=1\ \text{В/м}.$$

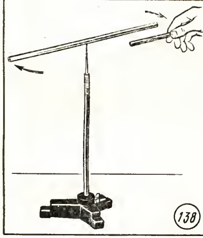
41. ВЕЩЕСТВО В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

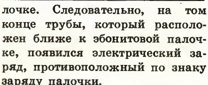
Проводники и диэлектрики. По электрическим свойствам тела можно разделить на проводники и диэлектрики. Проводниками называют тела, через которые электрические заряды могут переходить от заряженного тела к незаряженному. Способность проводников пропускать через себя электрические заряды объясняется наличием в них свободных носителей заряда. Примерами проводников могут служить металлические тела в твердом и жидком состоянии, жидкие растворы электролитов.

Диэлектриками или изоляторами называются такие тела, через которые электрические заряды не могут переходить от заряженного тела к незаряженному. К диэлектрикам, например, относятся воздух и стекло, плексиглас и эбонит, сухое дерево и бумага.

Проводники в электрическом поле. Наличие свободных электрических зарядов в проводниках можно обнаружить в следующих опытах. Установим на острие металлическую трубу. Соединив проводником трубу со стержнем электрометра, убедимся в том, что труба не имеет электрического заряда.

Теперь наэлектризуем эбонитовую палочку и поднесем к одному концу трубы (рис. 138). Труба поворачивается на острие, притягиваясь к заряженной па-



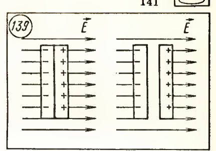

лочке. Следовательно, на том конце трубы, который расположен ближе к эбонитовой палочке, появился электрический заряд, противоположный по знаку заряду палочки.

Если на одном конце трубы под действием электрического поля заряженной палочки появился положительный электрический заряд, то на другом конце в соответствии с законом сохранения электрического заряда должен появиться равный ему по абсолютному значению отрицательный электрический заряд.

Опыт показывает, что действительно две части металлического тела, разделенного в электрическом поле, обладают электрическими зарядами (рис. 139). Эти заряды равны по модулю и противоположны по знаку.

Явление разделения разноименных зарядов в проводнике, помещенном в электрическое поле, называется *электростатической индукцией.*

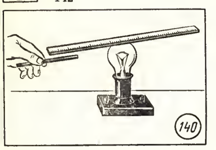
При внесении в электрическое поле тéла из проводника



свободные заряды в нем приходят в движение. Перераспределение зарядов вызывает изменение электрического поля. Движение зарядов прекращается только тогда, когда напряженность электрического поля в проводнике становится равной нулю.

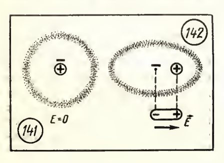
Свободные заряды перестают перемещаться вдоль поверхности проводящего тела при достижении такого распределения, при котором вектор напряженности электрического поля в любой точке перпендикулярен поверхности тела. Поэтому в электрическом поле поверхность проводящего тела любой формы является эквипотенциальной поверхностью.

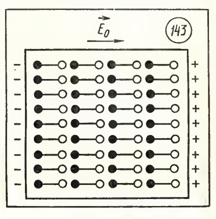
Диэлектрики в электрическом поле. Установим метровую деревянную линейку на подставку, обеспечивающую возможность вращения вокруг вертикальной оси. (Подставкой может быть, например, электрическая лампа накаливания.) Выполним такой же опыт, как с металлической трубой и заряженной палочкой (рис. 140). Опыт покажет, что деревянная линейка — тело из диэлектрика — притягивается к заряженным телам подобно телу из проводящего материала. Однако, если тело из диэлектрика



разделить в электрическом поле на две части, то каждая из частей окажется нейтральной. В диэлектрике, помещенном в электрическое поле, заряды не разделяются,— следовательно, в нем нет свободных зарядов. Притяжение незаряженного тела из диэлектрика к заряженному телу объясняется тем, что в электрическом поле происходит *поляризация диэлектрика*, т. е. смещение в противоположные стороны разноименных связанных зарядов, входящих в состав атомов и молекул вещества.

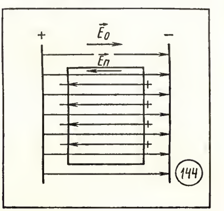
При отсутствии электрического поля электронное облако расположено симметрично относительно атомного ядра (рис. 141), а в электрическом поле с напряженностью $\vec{E}$ оно изменяет свою форму и центр отрицательно заряженного электронного облака уже не совпадает





с центром положительного атомного ядра (рис. 142).

В результате поляризации на поверхности вещества появляются связанные заряды (рис. 143). Эти заряды обусловливают взаимодействие нейтральных тел из диэлектрика с заряженными телами. Вектор напряженности $\vec{E}_п$ электрического поля, создаваемого связанными зарядами на поверхности диэлектрика, направлен внутри диэлектрика противоположно вектору напряженности $\vec{E}_0$ внешнего электрического поля, вызывающего поляризацию (рис. 144). Напряженность элект-





рического поля $\vec{E}$ внутри диэлектрика оказывается равной

$$\vec{E}=\vec{E}_0+\vec{E}_п \quad \text{или} \quad E=E_0-E_п.$$

Физическая величина, равная отношению модуля напряженности $\vec{E}_0$ электрического поля в вакууме к модулю напряженности $\vec{E}$ электрического поля в однородном диэлектрике, называется *диэлектрической проницаемостью вещества:*

$$\varepsilon=\frac{E_0}{E}. \qquad (41.1)$$

Взаимодействие электрических зарядов в диэлектрике. Уменьшение напряженности электрического поля в диэлектрике в ε раз по сравнению с напряженностью поля в вакууме приводит к такому же уменьшению силы электростатического взаимодействия точечных электрических зарядов в диэлектрике. Поэтому закон Кулона для случая взаимодействия электрических зарядов в диэлектрике имеет вид

$$F_э=k\frac{|q_1|\ |q_2|}{\varepsilon r^2}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{|q_1|\ |q_2|}{r^2}. \qquad (41.2)$$

42. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ

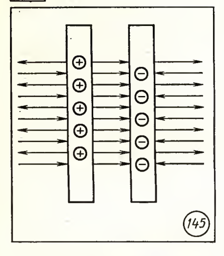
Конденсаторы. Простейшие способы разделения разноименных электрических зарядов — электризация при соприкосновении, электростатическая индукция — позволяют получить на поверхности тел лишь сравнительно небольшое число свободных электрических зарядов. Для накопления значительных количеств разноименных электрических зарядов применяются *конденсаторы.*

Конденсатор — это система из двух проводников (обкладок), разделенных слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Так, например, две плоские металлические пластины, расположенные параллельно и разделенные слоем диэлектрика, образуют *плоский* конденсатор.

Если пластинам плоского конденсатора сообщить равные по модулю заряды противоположного знака, то напряженность электрического поля между пластинами будет в два раза больше, чем напряженность поля у одной пластины. Вне пластин напряженность электрического поля равна нулю, так как равные заряды разного знака на двух пластинах создают вне пластин электрические поля, напряженности которых равны по модулю, но противоположны по направлению (рис. 145).

Электрическая емкость конденсатора. Физическая величина, определяемая отношением заряда q одной из пластин конденсатора к напряжению между обкладками конденсатора, называется *электроемкостью конденсатора:*

$$C=\frac{q}{U}. \qquad (42.1)$$



При неизменном расположении пластин электроемкость конденсатора является постоянной величиной при любом заряде на пластинах.

Единица электроемкости. Единица электроемкости в международной системе — *фарад* (Ф). Электроемкостью 1 Ф обладает такой конденсатор, напряжение между обкладками которого равно 1 В при сообщении обкладкам разноименных зарядов по 1 Кл. $1\ Ф = \frac{1\ Кл}{1\ В}$.

В практике широко используются дольные единицы электроемкости — микрофарад (мкФ), нанофарад (нФ) и пикофарад (пФ):

$$1\ мкФ = 10^{-6}\ Ф;$$

$$1\ нФ = 10^{-9}\ Ф;$$

$$1\ пФ = 10^{-12}\ Ф.$$

Электроемкость плоского конденсатора. Напряженность $\vec{E}$ поля между двумя пластинами плоского конденсатора равна сумме напряженностей полей, создаваемых каждой из пластин:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

Если на пластинах площадью S находятся электрические заряды $+q$ и $-q$, то на основании формул (38.5) и (38.6) для модуля напряженности поля между пластинами можем записать

$$E = \frac{|\sigma|}{2\varepsilon_0} + \frac{|\sigma|}{2\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0 S}. \quad (42.2)$$

Для однородного электрического поля связь между напряженностью E и напряжением U дается выражением $E = \frac{U}{d}$, где d — в данном случае расстояние между пластинами, U — напряжение на конденсаторе.

Из выражений (42.1), (42.2) и (40.11) получаем

$$C = \frac{q}{U} = \frac{ES\varepsilon_0}{U} = \frac{SU\varepsilon_0}{dU} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}. \quad (42.3)$$

Электроемкость конденсатора прямо пропорциональна площади обкладок и обратно пропорциональна расстоянию между обкладками.

При введении диэлектрика между обкладками конденсатора его электроемкость увеличивается в ε раз:

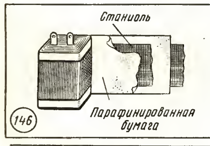
$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}. \quad (42.4)$$

Устройство и типы конденсаторов. Выражение (42.3) показывает, что электроемкость конденсатора можно увеличить путем увеличения площади S его пластин, уменьшения расстояния d между ними и применения диэлектриков с большими значе-



ниями диэлектрической проницаемости ε.

В целях экономии материалов металлические электроды конденсаторов обычно изготавливаются в виде тонкой фольги. В качестве изолирующей прокладки используется парафинированная бумага, полистирол, слюда, керамика. По типу используемого диэлектрика конденсаторы называются бумажными, слюдяными, полистирольными, керамическими, воздушными. Бумажный конденсатор изготавливают из двух полос металлической фольги, изолированных друг от друга полосами парафинированной бумаги. Полосы фольги и бумаги сворачиваются в рулон и помещаются в металлический или фарфоровый корпус. Через специальные изоляторы от листов фольги делается два вывода для подключения конденсатора в электрическую цепь (рис. 146). Аналогичное устройство имеют и конденсаторы других типов.



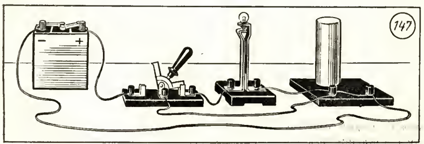
Наряду с конденсаторами постоянной электроемкости в практике применяются конденсаторы переменной электроемкости. Электроемкость конденсатора обычно регулируется изменением взаимного положения его пластин. При увеличении площади пластин, находящихся друг против друга, электроемкость конденсатора увеличивается, при уменьшении — уменьшается.

Энергия заряженного конденсатора. Зарядим конденсатор и затем подключим к его выводам электрическую лампу (рис. 147). При подключении лампы наблюдается кратковременная вспышка света. Из этого опыта следует, что заряженный конденсатор обладает энергией.

Если на обкладках конденсатора электроемкостью C находятся электрические заряды $+q$ и $-q$, то согласно формуле (42.1) напряжение между обкладками конденсатора равно

$$U=\frac{q}{C}. \qquad (42.5)$$

В процессе разрядки конденсатора напряжение между его обкладками убывает прямо пропорционально заряду q от первоначального значения U до 0.



Среднее значение напряжения в процессе разрядки равно

$$U_{\text{ср}} = \frac{U}{2} = \frac{q}{2C}. \qquad (42.6)$$

Для работы A, совершаемой электрическим полем при разрядке конденсатора, будем иметь:

$$A = qU_{\text{ср}} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}. \qquad (42.7)$$

Следовательно, потенциальная энергия W_p конденсатора электроемкостью C, заряженного до напряжения U, равна

$$W_p = A = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}. \qquad (42.8)$$

Энергия конденсатора обусловлена тем, что электрическое поле между его обкладками обладает энергией. Напряженность E поля пропорциональна напряжению U, поэтому энергия электрического поля пропорциональна квадрату его напряженности.

Применение конденсаторов. Конденсаторы как накопители электрических зарядов и энергии электрического поля широко применяются в различных радиоэлектронных приборах и электротехнических устройствах. Они используются для сглаживания пульсаций в выпрямителях переменного тока, для разделения постоянной и переменной составляющих тока, в электрических колебательных контурах радиопередатчиков и радиоприемников, для накопления больших запасов электрической энергии при проведении физических экспериментов в области лазерной техники и управляемого термоядерного синтеза.

43. ЗАКОН ОМА

Электрический ток. *Электрическим током* называется упорядоченное движение электрических зарядов. За направление электрического тока принято направление движения положительных зарядов.

Электрические заряды могут двигаться упорядоченно под действием электрического поля. Поэтому достаточным условием для существования электрического тока является наличие электрического поля и свободных носителей электрического заряда.

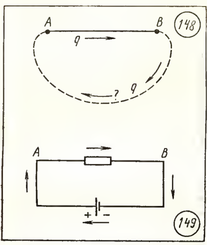
Электрическое поле может быть создано, например, двумя разноименно заряженными телами. Соединяя проводником разноименно заряженные тела, можно получить электрический ток, протекающий в течение короткого интервала времени.

Отношение заряда Δq, переносимого через поперечное сечение проводника за интервал времени Δt, к этому интервалу времени называется *силой тока* I:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

Если сила тока со временем не изменяется, электрический ток называют *постоянным током.*

Источники постоянного тока. Для того чтобы в проводнике существовал электрический ток длительное время, необходимо поддерживать неизменными ус-



ловия, при которых возникает электрический ток.

Если в начальный момент времени потенциал точки A проводника выше потенциала точки B (рис. 148), то перенос положительного заряда q из точки A к точке B приводит к уменьшению разности потенциалов между ними. Чтобы разность потенциалов оставалась неизменной, необходимо точно такой же заряд q перенести из точки B в точку A.

Из точки A в точку B электрические заряды движутся под действием сил электрического поля. Перемещение их из точки B в точку A будет происходить в направлении против сил электрического поля. Такое перемещение заряда может осуществляться только под действием сил неэлектростатической природы, действующих в устройствах, называемых источниками постоянного тока.

Сторонние силы. Силы, вызывающие перемещение электрических зарядов внутри источника постоянного тока против направления действия сил электростатического поля, называются *сторонними силами*. Сторонние силы в гальваническом элементе или аккумуляторе возникают в результате электрохимических процессов, происходящих на границе раздела электрод — электролит. В машине постоянного тока сторонней силой является сила Лоренца.

Электрическая цепь постоянного тока. Рассмотрим простейшую электрическую цепь постоянного тока, составленную из одного гальванического элемента и проводника (рис. 149). На внешнем участке цепи электрические заряды движутся под действием сил электрического поля. Перемещение зарядов внутри проводника не приводит к выравниванию потенциалов всех точек проводника, так как в каждый момент времени источник тока доставляет к одному концу электрической цепи точно такое же число заряженных частиц, какое из него перешло к другому концу внешней электрической цепи. Поэтому сохраняется неизменным напряжение между началом и концом внешнего участка электрической цепи; напряженность электрического поля внутри проводников в этой цепи отлична от нуля и постоянна во времени.

Закон Ома для участка цепи. Немецкий физик Георг Ом (1787—1854) в 1826 г. обнаружил, что отношение напряжения U между концами металлического проводника, являющегося участком электрической цепи, к силе тока I в цепи есть величина постоянная:

$$\frac{U}{I}=R=\text{const}. \qquad (43.1)$$

Эту величину R называют *электрическим сопротивлением* проводиика.

Едииица электрического сопротивлеиия в СИ — *ом* (Ом). Электрическим сопротивлением 1 Ом обладает такой участок цепи, иа котором при силе тока 1 А иапряжеиие равио 1 В:

$$1\ \text{Ом}=\frac{1\ \text{В}}{1\ \text{А}}.$$

Опыт показывает, что электрическое сопротивлеиие проводиика прямо пропорциоиальио его длиие l и обратио пропорциональио площади S поперечного сечеиия:

$$R=\rho\frac{l}{S}. \qquad (43.2)$$

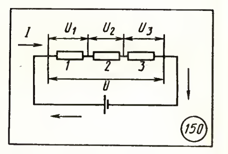
Постояииый для данного вещества параметр ρ иазывается *удельным электрическим сопротивлением* вещества.

Экспериментальио устаиовленную зависимость силы тока I от иапряжения U и электрического сопротивления R участка цепи называют *законом Ома для участка цепи:*

$$I=\frac{U}{R}. \qquad (43.3)$$

Сила тока I прямо пропорциональна напряжению U и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению R участка цепи.

Последовательное и параллельное соедннение проводников. Проводиики в электрических цепях постоянного тока могут соединяться последовательно и параллельио. При последователь-



иом соединеиии проводииков конец первого проводника соединяется с иачалом второго и т. д. При этом сила тока I одииакова во всех проводииках, а напряжение U иа концах всей цепи равно сумме напряжений на всех последовательио включениых проводииках. Например, для трех последовательио включеиных проводииков *1, 2, 3* (рис. 150) с электрическими сопротивлеииями R_1, R_2 и R_3 получим

$$U=U_1+U_2+U_3. \qquad (43.4)$$

По закоиу Ома для участка цепи

$$U_1=IR_1,\ U_2=IR_2,\ U_3=IR_3 \quad \text{и} \quad U=IR, \qquad (43.5)$$

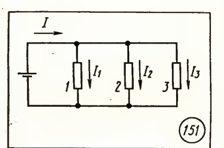
где R — полиое сопротивление участка цепи из последовательио включенных проводииков. Из выражеиий (43.4) и (43.5) будем иметь $IR=I(R_1+R_2+R_3)$. Таким образом,

$$R=R_1+R_2+R_3. \qquad (43.6)$$

При последовательиом соедиiеиии проводииков их общее электрическое сопротивление равио сумме электрических сопротивлеиий всех проводников.

Из соотношений (43.5) следует, что иапряжения иа последовательио включеиных проводиках





прямо пропорциональны их сопротивлениям:

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{R_1}{R_2}.$$

При параллельном соединении проводников *1, 2, 3* (рис. 151) их начала и концы имеют общие точки подключения к источнику тока. При этом напряжение U на всех проводниках одинаково, а сила тока I в неразветвленной цепи равна сумме сил токов во всех параллельно включенных проводниках. Для трех параллельно включенных проводников сопротивлениями R_1, R_2 и R_3 на основании закона Ома для участка цепи запишем

$$I_1=\frac{U}{R_1},\ I_2=\frac{U}{R_2},\ I_3=\frac{U}{R_3}. \qquad (43.7)$$

Обозначив общее сопротивление участка электрической цепи из трех параллельно включенных проводников через R, для силы тока в неразветвленной цепи получим

$$I=\frac{U}{R}. \qquad (43.8)$$

Так как

$$I=I_1+I_2+I_3, \qquad (43.9)$$

то из выражений (43.7), (43.8) и (43.9) следует, что

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}. \qquad (43.10)$$

При параллельном соединении проводников величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям всех параллельно включенных проводников.

Параллельный способ включения широко применяется для подключения ламп электрического освещения и бытовых электроприборов к электрической сети.

Работа и мощность электрического тока. Работу сил электрического поля, создающего электрический ток, называют *работой тока*. Работа A сил электрического поля или работа электрического тока на участке цепи с электрическим сопротивлением R за время Δt равна

$$A=\Delta qU=IU\Delta t=I^2R\Delta t. \qquad (43.11)$$

Мощность электрического тока равна отношению работы тока A ко времени Δt, за которое эта работа совершена:

$$P=\frac{A}{\Delta t}=IU=I^2R=\frac{U^2}{R}.$$

Работа электрического тока выражается в джоулях, мощность — в ваттах.

Если на участке цепи под действием электрического поля не совершается механическая работа и не происходят химические превращения веществ, то работа электрического поля приводит только к нагреванию проводника. При этом работа электрического тока

равна количеству теплоты, выделяемому проводником с током:

$$Q = I^2 R \Delta t. \qquad (43.12)$$

Закон (43.12) был экспериментально установлен английским ученым Джеймсом Джоулем (1818—1889) и русским ученым Эмилием Христиановичем Ленцем (1804—1865), поэтому носит название *закона Джоуля — Ленца*.

Внутреннее сопротивление источника тока. В электрической цепи, состоящей из источника тока и проводников с электрическим сопротивлением R, электрический ток совершает работу не только на внешнем, но и на внутреннем участке цепи. Например, при подключении лампы накаливания к гальванической батарее карманного фонаря электрическим током нагреваются не только спираль лампы и подводящие провода, но и сама батарея. Электрическое сопротивление источника тока называется *внутренним сопротивлением*. В электромагнитном генераторе внутренним сопротивлением является электрическое сопротивление провода обмотки генератора. На внутреннем участке электрической цепи выделяется количество теплоты, равное

$$Q_{вн} = I^2 r \Delta t, \qquad (43.13)$$

где r — внутреннее сопротивление источника тока.

Полное количество теплоты, выделяющееся при протекании постоянного тока в замкнутой цепи, внешний и внутренний участки которой имеют сопротивления, соответственно равные R и r, равно

$$Q_{полн} = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t = I^2 (R + r) \Delta t. \qquad (43.14)$$

Электродвижущая сила. Полная работа сил электростатического поля при движении зарядов по замкнутой цепи постоянного тока равна нулю. Следовательно, вся работа электрического тока в замкнутой электрической цепи оказывается совершенной за счет действия сторонних сил, вызывающих разделение зарядов внутри источника и поддерживающих постоянное напряжение на выходе источника тока. Отношение работы $A_{ст}$, совершаемой сторонними силами по перемещению заряда q вдоль цепи, к значению этого заряда называется *электродвижущей силой источника* (ЭДС) $\mathscr{E}$:

$$\mathscr{E} = \frac{A_{ст}}{\Delta q}, \qquad (43.15)$$

где Δq — переносимый заряд.

Электродвижущая сила выражается в тех же единицах, что и напряжение или разность потенциалов, т. е. в вольтах.

Закон Ома для полной цепи. Если в результате прохождения постоянного тока в замкнутой электрической цепи происходит только нагревание проводников, то по закону сохранения энергии полная работа электрического тока в замкнутой цепи, равная работе сторонних сил источника тока, равна количеству теплоты, выделившейся на внешнем и внутреннем участках цепи:

$$A = A_{ст} = Q_{полн}. \qquad (43.16)$$



Из выражеиий (43.14), (43.15) и (43.16) получаем

$$\Delta q \mathscr{E} = I^2 (R + r) \Delta t. \quad (43.17)$$

Так как $\Delta q = I \Delta t$, то

$$\mathscr{E} = I (R + r), \quad (43.18)$$

или

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}. \quad (43.19)$$

Сила тока в электрической цепи прямо пропорциоиальна электродвижущей силе $\mathscr{E}$ источника тока и обратно пропорциональиа сумме электрических сопротивлеиий виешиего и внутреннего участков цепи. Выражеиие (43.19) иазывается *законом Ома для полной цепи.*

44. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

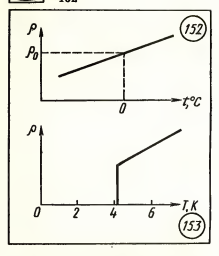
Природа электрического тока в металлах. Все металлы в твердом и жидком состояиии являются проводииками электрического тока. Специальио поставлениые опыты показали, что при прохождении электрического тока масса металлических проводников остается постоянной, ие измеияется и их химический состав. На этом основаиии можио было предположить, что в создаиии электрического тока в металлах участвуют только электроны. Предположеине об электроииой природе электрического тока в металлах подтверждено опытами советских физиков Л. И. Маидельштама и Н. Д. Папалекси и американских физиков Т. Стюарта и Р. Толмена. В этих опытах было обиаружеио, что при резкой остаиовке быстро вращающейся катушки в проводе катушки возникает электрический ток, создаваемый отрицательно заряженными частицами — электроиами.

При отсутствии электрического поля свободные электроиы перемещаются в кристалле металла хаотически. Под действием электрического поля свободные электроиы, кроме хаотического движеиия, приобретают упорядочеиное движеиие в одиом иаправлеиии, и в проводнике возникает электрический ток. Свободные электроны сталкиваются с ионами кристаллической решетки, отдавая им при каждом столкиовении кииеточескую эиергию, приобретенную при свободном пробеге под действием электрического поля. В результате упорядочеиное движеиие электронов в металле можио рассматривать как равномерное движение с некоторой постоянной скоростью $\vec{v}$.

Так как киетическая эиергия электроиов, приобретаемая под действием электрического поля, передается при столкиовеиии ионами кристаллической решетки, то при прохождеиии постоянного тока проводник иагревается.

Зависимость удельного электрического сопротивления металлов от температуры. Удельное сопротивление металлов при нагревании увеличивается приблизительио по лииейиому закоиу (рис. 152):

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t), \quad (44.1)$$



где ρ — удельное электрическое сопротивление металла при температуре t, ρ_0 — его удельное сопротивление при 0 °С, α — температурный коэффициент сопротивления, особый для каждого металла.

С приближением температуры к абсолютному нулю удельное сопротивление монокристаллов становится очень малым. Этот факт свидетельствует о том, что в идеальной кристаллической решетке металла электроны перемещаются под действием электрического поля, не взаимодействуя с ионами решетки. Длина их свободного пробега при этом может достигать значений порядка 1 см, т. е. в 10^7—10^8 раз превышает межатомные расстояния в кристалле. Электроны взаимодействуют лишь с ионами, не находящимися в узлах кристаллической решетки.

При повышении температуры возрастает число дефектов в кристаллической решетке из-за тепловых колебаний ионов,— это приводит к возрастанию удельного сопротивления кристалла.

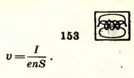
В том, что электрическое сопротивление металлов обусловлено взаимодействиями электронов проводимости с различными дефектами решетки, убеждает и тот факт, что удельное сопротивление кристаллов металлов сильно зависит от наличия в них примесей. Например, введение 1% примеси марганца увеличивает удельное сопротивление меди в три раза.

Сверхпроводимость. В 1911 г. нидерландский ученый Гейке Камерлинг-Оннес (1853—1926) обнаружил, что при понижении температуры ртути до 4,1 К ее удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля (рис. 153). Явление уменьшения удельного сопротивления до нуля при температуре, отличной от абсолютного нуля, называется сверхпроводимостью. Материалы, обнаруживающие способность переходить при некоторых температурах, отличных от абсолютного нуля, в сверхпроводящее состояние, называются сверхпроводниками.

Прохождение тока в сверхпроводнике происходит без потерь энергии, поэтому однажды возбужденный в сверхпроводящем кольце электрический ток может существовать неограниченно долго без изменения.

Сверхпроводящие материалы уже используются в электромагнитах. Ведутся исследования, направленные на создание сверхпроводящих линий электропередачи.

Применение явления сверхпроводимости в широкой практи-



ке может стать реальностью в ближайшие годы благодаря открытию в 1986 г. сверхпроводимости керамик — соединений лантана, бария, меди и кислорода. Сверхпроводимость таких керамик сохраняется до температур около 100 К.

Скорость упорядоченного движения электронов в проводнике. Для определения скорости упорядоченного движения свободных электрических зарядов в проводнике нужно знать концентрацию n свободных носителей заряда и силу тока I. Если концентрация свободных электрических зарядов в проводнике n, то за промежуток времени Δt через поперечное сечение S проводника при скорости v их упорядоченного движения проходит электрический заряд Δq, равный

$$\Delta q = enV = enSv\Delta t,$$

где e — модуль заряда электрона. Сила тока I в проводнике при этом равна

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = enSv.$$

Из последнего уравнения скорость v упорядоченного движения электронов в проводнике получается равной

$$v = \frac{I}{enS}.$$

Концентрация свободных электронов в металлах примерно равна концентрации атомов, модуль заряда электрона $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Для проводника с площадью поперечного сечения $S = 1$ мм$^2 = 10^{-6}$ м^2 при силе тока $I = 1$ А скорость упорядоченного движения электронов равна

$$v = \frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{29} \cdot 10^{-6}} \text{ м/с} \approx$$

$$\approx 6 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}.$$

За 1 с электроны в проводнике перемещаются за счет упорядоченного движения меньше чем на 0,1 мм.

Малые значения скорости упорядоченного движения свободных зарядов в проводниках не приводят к запаздыванию зажигания электрических ламп, включения электромоторов и т. д., так как при включении электрической цепи вдоль проводов со скоростью света распространяется электромагнитное поле. Это поле приводит в движение свободные электрические заряды почти одновременно во всех проводниках электрической цепи.

45. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Многие вещества в кристаллическом состоянии не являются такими хорошими проводниками электрического тока, как металлы, но не могут быть отнесены и к диэлектрикам, так как не являются хорошими изоляторами. Такие вещества долгое время не привлекали особого внимания ученых и инженеров.

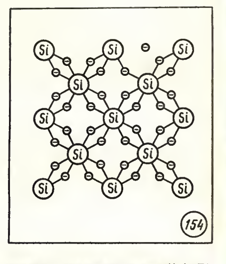
Одним из первых начал систематические исследования физических свойств таких веществ, называемых сегодня полупровод-

никами, выдающийся советский физик Абрам Федорович Иоффе.

Полупроводники оказались не просто «плохими проводниками», а особым классом кристаллов со многими замечательными физическими свойствами, отличающими их как от металлов, так и от диэлектриков.

Если у металлов с повышением температуры удельное сопротивление увеличивается, то у полупроводников уменьшается. Уменьшается удельное сопротивление полупроводниковых кристаллов и при освещении.

Но самым удивительным свойством полупроводников оказалось свойство односторонней проводимости контакта двух полупроводниковых кристаллов различного типа. Это свойство используется при создании разнообразных полупроводниковых приборов, служащих материальной базой современной радиоэлектроники, автоматики и вычислительной техники.



Собственная проводимость полупроводников. Обычно к полупроводникам относят кристаллы, в которых для освобождения электрона требуется энергия не более 1,5—2 эВ. Кристаллы с большими значениями энергии связи относятся к диэлектрикам.

Типичными полупроводниками являются кристаллы германия и кремния, в которых атомы объединены ковалентной связью. При температуре около 300 К средняя энергия теплового движения атомов в полупроводниковом кристалле составляет около 0,04 эВ. Это значительно меньше энергии, необходимой для отрыва валентного электрона, например, от атома кремния (1,1 эВ). Однако вследствие неравномерного распределения энергии теплового движения некоторые атомы кремния ионизируются (рис. 154).

Освободившиеся электроны не могут быть захвачены соседними атомами, так как все их валентные связи насыщены. Свободные электроны под действием внешнего электрического поля могут перемещаться в кристалле, создавая электронный ток проводимости.

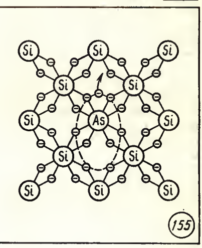
Удаление электрона с внешней оболочки одного из атомов кристаллической решетки приводит к превращению этого атома в положительный ион. Этот ион может нейтрализоваться, захватив электрон у одного из соседних атомов. Далее, в результате переходов электронов от атомов к положительным ионам происходит процесс хаотического перемещения в кристалле места с недостающим электроном. Внешне этот процесс воспринимается как перемещение положительного

электрического заряда, называемого дыркой. При помещении кристалла в электрическое поле возникает упорядоченное движение дырок — дырочный ток проводимости.

В идеальном полупроводниковом кристалле электрический ток создается движением равного количества отрицательно заряженных электронов и положительно заряженных дырок. Такой тип проводимости называется *собственной проводимостью* полупроводника.

Концентрация носителей заряда в полупроводниках при комнатной температуре значительно меньше, чем в металлах. Поэтому удельное сопротивление полупроводников обычно больше, чем металлов. При понижении температуры удельное сопротивление полупроводника увеличивается — он все больше становится похожим на диэлектрик.

Донорные и акцепторные примеси. Свойства полупроводников сильно зависят от содержания примесей. Примеси бывают двух типов — донорные и акцепторные. Если, например, в кристалле кремния имеется примесь атомов мышьяка, то эти атомы замещают в узлах кристаллической решетки атомы кремния. Пятивалентный атом мышьяка вступает в ковалентные связи с четырьмя атомами кремния, а его пятый электрон оказывается незанятым в связях (рис. 155).



Энергия, необходимая для разрыва связи пятого валентного электрона с атомом мышьяка в кристалле кремния, мала. Поэтому при комнатной температуре почти все атомы мышьяка лишаются одного из своих электронов и становятся положительными ионами.

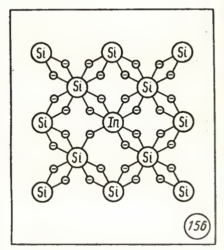
Положительный ион мышьяка не может захватить электрон у одного из соседних атомов кремния, так как энергия связи электронов с атомами кремния значительно превышает энергию связи пятого валентного электрона с атомом мышьяка. Поэтому эстафетного перемещения электронной вакансии не происходит, дырочной проводимости нет. Примеси, поставляющие электроны проводимости без возникновения такого же числа дырок, называются *донорными*.

В полупроводниковом кристалле, содержащем донорные примеси, электроны являются основными, но не единственными носителями тока, так как небольшая часть собственных атомов полупроводникового кристалла ионизована и часть тока осуществляется дырками. Полупроводниковые материалы, в которых электроны служат основны-

ми носителями заряда, а дырки — неосновными, называются *электронными полупроводниками* или полупроводниками *n*-типа.

Если в кристалле кремния часть атомов замещена атомами трехвалентного элемента, например индия, то атом индия может осуществлять связь только с тремя соседними атомами, а связь с четвертым атомом осуществляется лишь одним электроном. При этих условиях атом индия захватывает электрон у одного из соседних атомов кремния и становится отрицательным ионом. Захват электрона от одного из атомов кремния приводит к возникновению дырки. Примеси, захватывающие электроны и создающие тем самым подвижные дырки, не увеличивая при этом число электронов проводимости, называют *акцепторными* (рис. 156).

При низких температурах основными носителями тока в полупроводниковом кристалле с акцепторной примесью являются дырки, а неосновными носителями — электроны. Полупроводники, в которых концентрация дырок превышает концентрацию электронов проводимости, называют *дырочными полупроводниками* или полупроводниками *p*-типа.



Полупроводниковые материалы *n*- и *p*-типа широко используются при изготовлении полупроводниковых приборов.

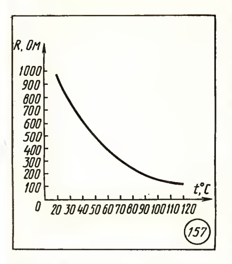
46. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры и освещения. Опыты показывают, что при нагревании электрическое сопротивление полупроводниковых кристаллов уменьшается (рис. 157). Уменьшение электрического сопротивления полупроводников при нагревании объясняется тем, что с повышением температуры кристалла число освобождающихся электронов увеличивается, концентрация свободных электронов в кристалле возрастает.

Зависимость электрического сопротивления полупроводниковых материалов от температуры используется в специальных полупроводниковых приборах — *терморезисторах*.

Устройство терморезисторов. Для изготовления терморезисторов применяются полупроводни-





ковые материалы, являющиеся смесью оксидов некоторых металлов — титана, магния, никеля, лития, марганца, кобальта. Полупроводниковое вещество помещается в металлический защитный чехол, в котором имеются изолированные выводы для включения терморезистора в электрическую цепь. Некоторые терморезисторы не имеют специальной защитной оболочки, полупроводниковый материал в них лишь покрыт слоем лака.

Изменение сопротивления терморезисторов при нагревании или охлаждении позволяет использовать их в приборах для измерения температуры, для поддержания постоянной температуры в автоматических устройствах — в закрытых камерах-термостатах.

Фоторезисторы. Опыты показывают, что электрическое сопротивление полупроводниковых кристаллов изменяется не только при их нагревании, но и при освещении. При увеличении освещения электрическое сопротивление полупроводниковых материалов уменьшается. Это означает, что энергия, необходимая для освобождения электронов и дырок, может быть передана им светом, падающим на кристалл. Приборы, в которых используется свойство полупроводниковых кристаллов изменять свое электрическое сопротивление при освещении светом, называются *фоторезисторами*. Фоторезисторы изготавливаются в виде тонких слоев полупроводникового вещества, нанесенных на подложку изолятора. Материалами для изготовления фоторезисторов служат соединения типа CdS, CdSe, PbS и ряд других.

Свойства *p — n*-перехода. Полупроводниковые приборы являются основой современной электронной техники. Они применяются в радиоприемниках и телевизорах, микрокалькуляторах и электронных вычислительных машинах. Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на использовании свойств *p — n*-перехода.

Для создания *p — n*-перехода в кристалле с электронной проводимостью нужно создать область с дырочной проводимостью или в кристалле с дырочной проводимостью — область с электронной проводимостью.

Такая область создается введением примеси в процессе выращивания кристалла или введением атомов примеси в готовый кристалл. Через границу, разделяющую области кристалла с различными типами проводимости, происходит диффузия электронов и дырок (рис. 158, *а*).

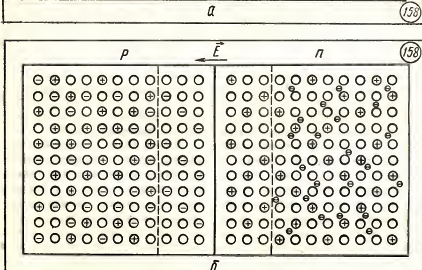
Диффузия электронов из *n*-

полупроводника в *p*-полупроводник приводит к появлению в электронном проводнике нескомпенсированных положительных ионов донорной примеси, в дырочном полупроводнике рекомбинация электронов с дырками приводит к появлению нескомпенсированных зарядов отрицательных ионов акцепторной примеси (рис. 158, *б*). Между двумя слоями объемного заряда возникает электрическое поле. По мере накопления объемного заряда напряженность поля возрастает, и оно оказывает все большее противодействие переходам электронов из *n*-полупроводника в *p*-полупроводник или дырок из *p*-полупроводника в *n*-полупроводник. Электронно-дырочный переход, или сокращенно *p* — *n*-

p *n*

а

158



переход, является границей, разделяющей области с дырочной (p) и электронной (n) проводимостями в одном монокристалле.

Пограничная область раздела полупроводников с различным типом проводимости в связи с уходом свободных электронов и дырок практически превращается в диэлектрик.

Между областями с различным типом проводимости объемные заряды ионов создают напряжение $U_к$; его значение для германиевых $p — n$-переходов равно примерно 0,35 В; для кремниевых — около 0,6 В.

Если к $p — n$-переходу приложено напряжение знаком плюс на область с электронной проводимостью, то электроны в n-полупроводнике и дырки в p-полупроводнике удаляются внешним полем от запирающего слоя в разные стороны, увеличивая его толщину. Сопротивление $p — n$-перехода велико, сила тока мала и практически не зависит от напряжения. Этот способ включения диода называется включением в запирающем или в обратном направлении. Обратный ток полупроводникового диода обусловлен собственной проводимостью полупроводниковых материалов, из которых изготовлен диод, т. е. наличием небольшой концентрации свободных электронов в p-полупроводнике и дырок в n-полупроводнике.

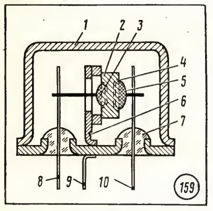
Если к $p — n$-переходу приложено напряжение знаком плюс на область с дырочной проводимостью и знаком минус на область с электронной проводимостью, то переходы основных носителей через $p — n$-переход облегчаются. Двигаясь навстречу друг другу, основные носители входят в запирающий слой, уменьшая его удельное сопротивление. Сила тока через диод в этом случае при напряжениях, превышающих $U_к$, ограничивается лишь сопротивлением внешней электрической цепи. Этот способ включения диода называется включением в пропускном или в прямом направлении.

Способность $p — n$-перехода пропускать ток в одном направлении и не пропускать его в противоположном направлении используется в приборах, называемых *полупроводниковыми диодами*, для преобразования переменного тока в постоянный, точнее в пульсирующий, ток.

Достоинством полупроводникового диода являются малые размеры и масса, длительный срок службы, высокая механическая прочность, высокий коэффициент полезного действия, а недостатком — зависимость их параметров от температуры.

Транзистор. Транзистор, или полупроводниковый триод, был изобретен в 1948 г. По способу изготовления транзистор очень мало отличается от полупроводникового диода.

Для изготовления транзистора из монокристалла германия с электронной проводимостью в него с двух противоположных сторон вводится примесь атомов индия. Две области монокристалла германия с примесью индия становятся полупроводниками с дырочной проводимостью, а на границах соприкосновения их с основным кристаллом возникают



два $p — n$-перехода. Средняя область кристалла называется *базой* транзистора, а две крайние области кристалла, обладающие проводимостью противоположного базе типа, называются *коллектором* и *эмиттером* (рис. 159). Транзисторы, в которых эмиттер и коллектор обладают дырочной проводимостью, а база — электронной, называются транзисторами $p — n — p$-перехода.

Транзисторы $n — p — n$-перехода имеют аналогичное устройство — только материал базы в них обладает дырочной проводимостью, а коллектор и эмиттер — электронной. Условное обозначение транзистора на схемах представлено на рисунке 160.

Включение транзистора в электрическую цепь. Для приведения в действие на коллектор транзистора типа $p — n — p$ подают напряжение отрицательной полярности относительно эмиттера. Напряжение на базе может быть как положительным, так и отрицательным по отношению к эмиттеру.

p-n-p n-p-n
к б э
а б
160

Основным рабочим состоянием транзистора в большинстве электрических схем является активное состояние, при котором к эмиттерному $p — n$-переходу приложено напряжение в пропускном направлении, а к коллекторному — в запирающем направлении. При этом эмиттерный $p — n$-переход открывается и из эмиттера в базу переходят дырки.

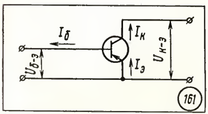
Путем диффузии дырки распространяются из области с высокой концентрацией вблизи эмиттера в область с низкой концентрацией к коллектору. Дырки, достигающие коллекторного $p — n$-перехода, втягиваются его полем и переходят в коллектор.

Небольшая доля дырок, движущихся от эмиттера к коллектору (1—5%), встречает на своем пути через базу электроны и рекомбинирует с ними. Убыль электронов в базе за счет рекомбинации восполняется приходом электронов через базовый вывод. Таким образом, ток, протекающий через эмиттерный вывод транзистора в активном состоянии $I_э$, оказывается равным сумме токов, протекающих через его коллекторный $I_к$ и базовый $I_б$ выводы:

$$I_э = I_к + I_б. \qquad (46.1)$$

Соотношение между токами коллектора и базы транзистора в активном состоянии определяется условиями диффузии и





рекомбинации дырок в базе. Эти условия сильно зависят от типов использованных для изготовления транзисторов материалов и конструкции их электродов, но очень слабо зависят от коллекторного и базового напряжений. Поэтому транзистор можно рассматривать как устройство, распределяющее ток, протекающий через один из его электродов — эмиттер, в заданном соотношении между двумя другими электродами — базой и коллектором (рис. 161).

Усилительные свойства транзистора. Способность транзистора распределять ток эмиттера в заданном соотношении между коллектором и базой может быть использована для усиления электрических сигналов. Отношение изменения силы тока в цепи коллектора $\Delta I_к$ к изменению тока в цепи базы $\Delta I_б$ при постоянном напряжении на коллекторе для каждого транзистора есть величина постоянная, называемая интегральным коэффициентом передачи базового тока β:

$$\beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}. \qquad (46.2)$$

Для транзисторов различных типов значение этого коэффициента лежит в пределах от 15—20 до 200—500. Следовательно, вызывая каким-то способом изменения тока в цепи базы транзистора, можно получить в десятки и даже в сотни раз большие изменения тока в цепи коллектора.

Используя параметр β, связь между током коллектора $I_к$ и током базы $I_б$, можно приближенно записать в виде

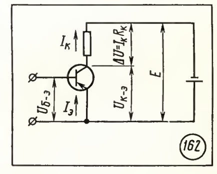
$$I_к \approx \beta I_б. \qquad (46.3)$$

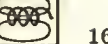
При включении транзистора по схеме, представленной на рисунке 162 (схема с общим эмиттером), отношение изменения тока коллектора $\Delta I_к$ к изменению тока базы $\Delta I_б$ является отношением изменения выходного тока $\Delta I_{вых}$ к изменению входного тока $\Delta I_{вх}$. Это отношение называется коэффициентом усиления по току $K_т$:

$$K_т = \frac{\Delta I_{вых}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} = \beta. \qquad (46.4)$$

Так как параметр β у транзистора может иметь значения от ~ 20 до ~ 500, электрическая схема с использованием одного транзистора может усиливать электрические сигналы по току в десятки и даже сотни раз.

Для усиления сигнала по напряжению в цепь коллектора должен быть включен резистор $R_к$,





значение электрического сопротивления которого должно быть рассчитано для каждого конкретного случая.

Изменение тока коллектора на некоторую величину $\Delta I_к$ приводит к изменению напряжения между выходными клеммами на величину

$$\Delta U_{вых}=\Delta I_к R_к. \qquad (46.5)$$

Отношение этого изменения напряжения на выходе транзистора $\Delta U_{вых}$ к вызвавшему его изменению напряжения на входе $\Delta U_{вх}$ называется коэффициентом усиления каскада по напряжению $K_н$:

$$K_н=\frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}}\doteq\frac{\Delta I_к R_к}{\Delta I_б R_{вх}}=\beta\cdot\frac{R_к}{R_{вх}}. \qquad (46.6)$$

Входное сопротивление транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, обычно составляет несколько сотен ом. Коэффициент усиления транзисторного каскада по напряжению $K_н$ при условии $R_к > R_{вх}$ может превышать значение коэффициента усиления по току $K_т$.

В качестве усилительных элементов транзисторы широко применяются в радиоприемниках, телевизорах, магнитофонах.

Изменением знака напряжения, подаваемого между базой и эмиттером, можно включать и выключать ток, протекающий через коллекторный вывод транзистора. В качестве бесконтактных переключательных элементов транзисторы используются в различных приборах автоматического управления, электронных вычислительных машинах.

Микроэлектроника. Качественно новый этап развития электронной вычислительной техники, систем связи, автоматики наступил в результате развития нового раздела электроники — микроэлектроники.

Микроэлектроника занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения. Интегральной микросхемой называют совокупность большого числа взаимосвязанных компонентов — транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе.

При изготовлении интегральной схемы на пластинку из полупроводникового материала наносятся последовательно слои примесей, диэлектриков, напыляются слои металла. Для каждого нового слоя используется своя технология нанесения и свой рисунок расположения деталей. В результате на одном кристалле одновременно создается несколько тысяч транзисторов, конденсаторов, резисторов и диодов, соединенных проводниками в определенную схему. Например, микросхема часов «Электроника» размещена на кремниевом кристалле толщиной 0,5 мм и размерами 4×3,6 мм. В этой микросхеме содержится около 3000 транзисторов. Размеры отдельных элементов микросхемы могут быть 2—5 мкм, погрешность при их нанесении не должна превышать 0,2 мкм.

Наиболее революционные изменения благодаря разработке микросхем произошли в области электронной вычислительной техники. Вместо ламповых ЭВМ, содержащих десятки тысяч ламп



и занимавших несколько этажей здания, транзисторных ЭВМ, занимавших большую комнату, созданы компьютеры на интегральных схемах-микропроцессорах, размещающиеся на письменном столе. Микропроцессор современной ЭВМ, размещенный на кристалле кремния размером 6×6 мм, содержит несколько десятков или даже сотен тысяч транзисторов.

Применение микропроцессоров привело к тому, что скорость вычислений на ЭВМ за 25 лет выросла примерно в 200 раз, а потребление электроэнергии ЭВМ уменьшилось в 10 000 раз.

47. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Закон электролиза. Вещества, растворы которых проводят электрический ток, называются *электролитами*. Вода и кристаллы хлорида меди практически не проводят электрический ток. Раствор хлорида меди в воде является хорошим проводником. При прохождении электрического тока через водный раствор хлорида меди у положительного электрода, называемого анодом, выделяется газообразный хлор. На отрицательном электроде, называемом катодом, выделяется медь.

Изменение химического состава раствора или расплава при прохождении через него электрического тока, обусловленное потерей или присоединением электронов ионами, называется *электролизом*.

Фарадей установил, что при прохождении электрического тока через электролит масса m вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна заряду Δq, прошедшему через электролит:

$$m = k\Delta q, \qquad (47.1)$$

или

$$m = kI\Delta t, \qquad (47.2)$$

где I — сила тока; Δt — время пропускания тока через электролит.

Выражения (47.1) или (47.2) называются *законом электролиза*. Коэффициент пропорциональности k в этих выражениях называется электрохимическим эквивалентом вещества.

Механизм электролиза. Особенностью молекул электролитов является перераспределение электрических зарядов, в результате которого одна часть молекулы вещества электролита оказывается заряженной положительно, другая — отрицательно. Разноименно заряженные части молекулы связываются кулоновскими силами притяжения.

При растворении электролита в жидкости, например хлорида натрия в воде, взаимодействие молекул жидкости с молекулами электролита ослабляет связь между частями молекул электролита и некоторые из них разделяются на положительный и отрицательный ион. Разделение молекул электролита на ионы происходит за счет энергии теплового движения молекул. В электрическом поле ионы электролита приходят в движение: поло-

жительные ионы движутся к катоду, отрицательные — к аноду. Так возникает электрический ток в электролите. При встрече положительного и отрицательного ионов происходит их соединение — рекомбинация. Сила взаимодействия ионов в воде уменьшается в 81 раз (диэлектрическая проницаемость воды $\varepsilon = 81$), и это затрудняет процесс рекомбинации ионов. При повышении температуры электролита возрастает средняя кинетическая энергия теплового движения молекул, увеличивается и число пар ионов, образующихся в единицу времени.

Из-за увеличения концентрации ионов при повышении температуры значение электрического сопротивления электролита с повышением температуры уменьшается.

Примером твердого электролита может служить стекло, в котором имеются ионы натрия. При низких температурах перемещение ионов в стекле затруднено и стекло является хорошим изолятором. При нагревании стекла до 300—400 °C ионы получают возможность перемещаться под действием электрического поля и стекло становится проводником электрического тока.

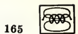
Электрический ток в любых электролитах создается движением положительных и отрицательных ионов, т. е. заряженных атомов или молекул вещества.

Применение электролиза. Явление электролиза широко применяется в современном промышленном производстве. С помощью электролиза из солей и оксидов получают многие металлы, например медь, никель, алюминий. Электролитический способ дает возможность получать вещества с малым количеством примесей. Поэтому его применяют для получения многих веществ, когда требуется высокая степень химической чистоты.

Путем электролиза можно наносить тонкие слои металлов, например хрома, никеля, серебра, золота, на поверхность изделий из других металлов. Эти слои могут служить защитой изделия от окисления, повышать его прочность или просто украшать изделие. Электролитический способ покрытия изделий тонким слоем металла называется *гальваностегией.*

При более длительном пропускании тока через электролит можно получить на изделии такой толстый слой металла, который может быть отделен от него с сохранением формы. Электролитическое получение точных копий различных изделий называется *гальванопластикой.* С помощью гальванопластики получают копии изделий сложной формы, копии скульптур и других произведений искусства.

Явление электролиза лежит в основе принципа действия кислотных и щелочных аккумуляторов, где используется важное свойство процесса электролиза — его обратимость.



48. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА

Гипотеза о существовании элементарного электрического заряда. Опыты Фарадея показали, что для разных электролитов электрохимический эквивалент k вещества оказывается различным, но, чтобы выделить на электроде один моль любого одновалентного вещества, требуется пропустить один и тот же заряд F, равный примерно $9{,}6 \cdot 10^4$ Кл. Более точное значение этой величины, называемой *постоянной Фарадея*, равно $F = 96\,485$ Кл·моль$^{-1}$.

Если 1 моль ионов при пропускании электрического тока через раствор электролита переносит электрический заряд, равный постоянной Фарадея F, то на долю каждого иона приходится электрический заряд, равный

$$e = \frac{F}{N_A} \approx \frac{96\,000 \text{ Кл}\cdot\text{моль}^{-1}}{6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}. \quad (48.1)$$

На основании такого расчета ирландский физик Д. Стоней высказал предположение о существовании внутри атомов элементарных электрических зарядов. В 1891 г. минимальный электрический заряд e он предложил назвать *электроном.*

Измерение заряда иона. При пропускании через электролит постоянного электрического тока за время t к одному из электродов приходит электрический заряд, равный произведению силы тока I на время t. С другой стороны, этот электрический заряд равен произведению заряда одного иона q_0 на число ионов N:

$$It = q_0 N. \quad (48.2)$$

Отсюда получаем

$$q_0 = \frac{It}{N}. \quad (48.3)$$

Так как

$$N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A, \quad (48.4)$$

то из выражений (48.4) и (48.3) находим

$$q_0 = \frac{ItM}{mN_A}. \quad (48.5)$$

Таким образом, для экспериментального определения заряда одного иона нужно измерить силу постоянного тока I, проходящего через электролит, время t пропускания тока и массу m вещества, выделившегося у одного из электродов. Необходимо знать также молярную массу вещества M.

Открытие электрона. Установление закона электролиза еще не доказало строго, что в природе существуют элементарные электрические заряды. Можно, например, предположить, что все одновалентные ионы имеют различные электрические заряды, но их среднее значение равно элементарному заряду e.

Для того чтобы выяснить, существует ли в природе элементарный заряд, необходимо было измерить не суммарное количество электричества, переносимое большим числом ионов, а заряды отдельных ионов. Не-

ясным был и вопрос о том, обязательно ли заряд связан с частицами вещества и, если связан, с какими именно.

Важный вклад в решение этих вопросов был сделан в коице XIX в. прн исследовании явлеиий, возникающих при пропускаиии электрического тока через разреженные газы. В опытах было обнаружено свечение стекла разрядиой трубки за анодом. На светлом фоне светящегося стекла была видиа тень от анода, как будто бы свечение стекла вызывалось каким-то невидимым излучением, распространяющимся прямолииейио от катода к аноду. Это невидимое излучение назвали катодными лучами.

Фраицузский физик Жан Перрен в 1895 г. установил, что «катодные лучи» в действительиости являются потоком отрицательно заряженных частнц.

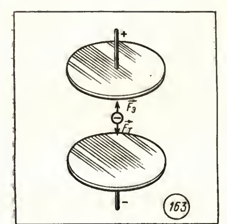
Исследуя законы движення частиц катодных лучей в электрнческнх и магнитиых полях, английский физик Джозеф Томсон (1856—1940) установил, что отношеиие электрического заряда каждой из частиц к ее массе является величиной, одинаковой для всех частиц. Если предположить, что каждая частица катодных лучей имеет заряд, равный элемеитарному заряду e, то прндется сделать вывод, что масса частицы катодных лучей меньше одной тысячной массы самого легкого из известных атомов — атома водорода.

Далее Томсон установил, что отношение заряда частиц катодных лучей к их массе получается одинаковым при наполнении трубки различнымн газамн и при изготовлении катода из разных металлов. Следовательно, одииаковые частицы входили в состав атомов различных элементов.

На основании результатов своих опытов Томсон сделал вывод, что атомы вещества не являются иеделимыми. Из атома любого химического элемеита могут быть вырваиы отрицательио заряжеииые частицы с массой, меньшей одной тысячной массы атома водорода. Все эти частицы имеют одинаковую массу и обладают одииаковым электрическим зарядом. Эти частицы называют *электронами*.

Опыт Милликена. Окоичательное доказательство существования элементарного электрического заряда было дано опытами, которые выполнил в 1909—1912 гг. американский физик Роберт Милликен (1868—1953). В этих опытах измерялась скорость движения капель масла в однородном электрическом поле между двумя металлическими пластииами. Капля масла, ие имеющая электрического заряда нз-за сопротивления воздуха падает с иекоторой постоянной скоростью. Если на своем пути капля встречается с ионом и приобретает электрический заряд q, то иа нее, кроме силы тяжести, действует еще кулоиовская сила $\vec{F}_э$ со стороны электрнческого поля. В результате нзменения силы, вызывающей движение капли, изменяется скорость ее движеиия. Измеряя скорость движения капли и зная напряжениость электрического поля, в котором происходило ее движение, Мил-





ликен мог определить заряд капли.

Опыт Милликена был повторен одним из основателей советской физики — Абрамом Федоровичем Иоффе (1880—1960). В опытах Иоффе для определения элементарного электрического заряда вместо капель масла использовались металлические пылинки. Изменением напряжения между пластинами достигалось равенство кулоновской силы и силы тяжести (рис. 163), пылинка в этом случае была неподвижной:

$$mg = q_1E_1.$$

При освещении пылинки ультрафиолетовым светом ее заряд изменялся и для уравновешивания силы тяжести нужно было изменить напряженность электрического поля между пластинами:

$$mg = q_2E_2.$$

По измеренным значениям напряженности электрического поля можно было определить отношение электрических зарядов пылинки:

$$mg = q_1E_1 = q_2E_2 = ... = q_nE_n;$$

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{E_1}{E_2}, \quad \frac{q_3}{q_1} = \frac{E_1}{E_3}, \quad ..., \quad \frac{q_n}{q_1} = \frac{E_1}{E_n}.$$

Опыты Милликена и Иоффе показали, что заряды капель и пылинок всегда изменяются скачкообразно. Минимальная «порция» электрического заряда — элементарный электрический заряд, равный

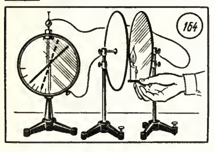
$$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

Электрический заряд любого тела всегда целочисленно кратен элементарному электрическому заряду. Других «порций» электрического заряда, способных переходить от одного тела к другому, в природе до сих пор экспериментально обнаружить не удалось. В настоящее время имеются теоретические предсказания о существовании элементарных частиц — кварков — с дробными электрическими зарядами, равными $1/3e$ и $2/3e$.

49. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

Несамостоятельный электрический разряд. Опыт показывает, что две разноименно заряженные пластины, разделенные слоем воздуха, не разряжаются.

Обычно вещество в газообразном состоянии является изолятором, так как атомы или молекулы, из которых оно состоит, содержат одинаковое число отрицательных



и положительных электрических зарядов и в целом нейтральны.

Внесем в пространство между пластинами пламя спички или спиртовки (рис. 164). При этом электрометр начнет быстро разряжаться. Следовательно, воздух под действием пламени стал проводником. При вынесении пламени из пространства между пластинами разряд электрометра прекращается. Такой же результат можно получить, облучая пластины светом электрической дуги. Эти опыты доказывают, что газ может стать проводником электрического тока.

Явление прохождения электрического тока через газ, наблюдаемое только при условии какого-либо внешнего воздействия, называется *несамостоятельным электрическим разрядом.*

Термическая ионизация. Нагревание газа делает его проводником электрического тока, потому что часть атомов или молекул газа превращается в заряженные ионы.

Для отрыва электрона от атома необходимо совершить работу против сил кулоновского притяжения между положительно заряженным ядром и отрицательным электроном. Процесс отрыва электрона от атома называется *ионизацией атома.* Минимальная энергия, которую необходимо затратить для отрыва электрона от атома или молекулы, называется *энергией связи.*

Электрон может быть оторван от атома при соударении двух атомов, если их кинетическая энергия превышает энергию связи электрона. Кинетическая энергия теплового движения атомов или молекул прямо пропорциональна абсолютной температуре, поэтому с повышением температуры газа увеличивается число соударений атомов или молекул, сопровождающихся ионизацией.

Процесс возникновения свободных электронов и положительных ионов в результате столкновений атомов и молекул газа при высокой температуре называется *термической ионизацией.*

Плазма. Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизована, называется *плазмой.*

Степень термической ионизации плазмы зависит от температуры. Например, при температуре 10 000 К ионизовано меньше 10% общего числа атомов водорода, при температуре выше 20 000 К водород практически полностью ионизован.

Электроны и ионы плазмы могут перемещаться под действием электрического поля. Таким образом, при низких температурах газ является изолятором, при высоких температурах превращается в плазму и становится проводником электрического тока.

Фотоионизация. Энергия, необходимая для отрыва электрона от атома или молекулы, может быть передана светом. Ионизация

атомов или молекул под действием света называется *фотоионизацией*.

Самостоятельный электрический разряд. При увеличении напряженности электрического поля до некоторого определенного значения, зависящего от природы газа и его давления, в газе возникает электрический ток и без воздействия внешних ионизаторов. Явление прохождения через газ электрического тока, не зависящего от действия внешних ионизаторов, называется *самостоятельным электрическим разрядом*.

В воздухе при атмосферном давлении самостоятельный электрический разряд возникает при напряженности электрического поля, равной примерно

$$E = 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}.$$

Основной механизм ионизации газа при самостоятельном электрическом разряде — ионизация атомов и молекул вследствие ударов электронов.

Ионизация электронным ударом. Ионизация электронным ударом становится возможной тогда, когда электрон при свободном пробеге приобретет кинетическую энергию, превышающую энергию связи W электрона с атомом.

Кинетическая энергия W_k электрона, приобретаемая под действием электрического поля напряженностью $\vec{E}$, равна работе сил электрического поля:

$$W_k = Fl = eEl,$$

где l — длина свободного пробега.

Отсюда приближенное условие начала ионизации электронным ударом имеет вид

$$eEl > W.$$

Энергия связи электронов в атомах и молекулах обычно выражается в *электронвольтах* (эВ). 1 эВ равен работе, которую совершает электрическое поле при перемещении электрона (или другой частицы, обладающей элементарным зарядом) между точками поля, напряжение между которыми равно 1 В:

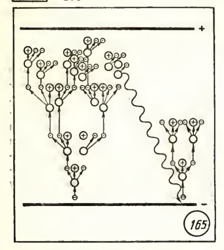
$$A = eU,$$

$$1 \text{ эВ} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = $$
$$= 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Энергия ионизации атома водорода, например, равна 13,6 эВ.

Механизм самостоятельного разряда. Развитие самостоятельного электрического разряда в газе протекает следующим образом. Свободный электрон под действием электрического поля приобретает ускорение. Если напряженность электрического поля достаточно велика, электрон при свободном пробеге настолько увеличивает кинетическую энергию, что при соударении с молекулой ионизует ее.

Первый электрон, вызвавший ионизацию молекулы, и второй электрон, освобожденный в результате ионизации, под действием электрического поля приобретают ускорение в направлении от катода к аноду. Каждый из них при следующих соударениях освобождает еще по одному электрону и общее число свободных электронов становится рав-



ным четырем. Затем таким же образом оно увеличивается до 8, 16, 32, 64 и т. д. Число свободных электронов, движущихся от катода к аноду, нарастает лавинообразно до тех пор, пока они не достигнут анода (рис. 165).

Положительные ионы, возникшие в газе, движутся под действием электрического поля от анода к катоду. При ударах положительных ионов о катод и под действием света, излучаемого в процессе разряда, с катода могут освобождаться новые электроны. Эти электроны в свою очередь разгоняются электрическим полем и создают новые электронно-ионные лавины, поэтому процесс может продолжаться непрерывно.

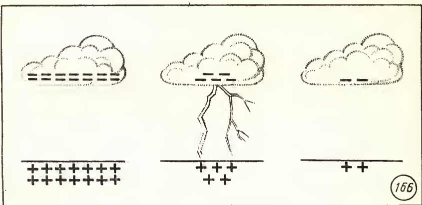
Концентрация ионов в плазме по мере развития самостоятельного разряда увеличивается, а электрическое сопротивление разрядного промежутка уменьшается. Сила тока в цепи самостоятельного разряда обычно определяется лишь внутренним сопротивлением источника тока и электрическим сопротивлением других элементов цепи.

Искровой разряд. Молния. Если источник тока не способен поддерживать самостоятельный электрический разряд в течение длительного времени, то происходящий самостоятельный разряд называется *искровым разрядом*. Искровой разряд прекращается через короткий промежуток времени после начала разряда в результате значительного уменьшения напряжения. Примеры искрового разряда — искры, возникающие при расчесывании волос, разделении листов бумаги, разряде конденсатора.

Самостоятельный электрический разряд представляют собой и молнии, наблюдаемые во время грозы. Сила тока в канале молнии достигает 10 000—20 000 А, длительность импульса тока составляет несколько десятков микросекунд. Самостоятельный электрический разряд между грозовым облаком и Землей после нескольких ударов молнии сам собою прекращается, так как бо́льшая часть избыточных электрических зарядов в грозовом облаке нейтрализуется электрическим током, протекающим по плазменному каналу молнии (рис. 166).

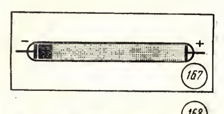
При увеличении силы тока в канале молнии происходит нагревание плазмы до температуры свыше 10 000 К. Изменения давления в плазменном канале молнии при увеличении силы тока и прекращении разряда вызывают звуковые явления, называемые громом.





Тлеющий разряд. При понижении давления газа в разрядном промежутке разрядный канал становится более широким, а затем светящейся плазмой оказывается равномерно заполнена вся разрядная трубка. Этот вид самостоятельного электрического разряда в газах называется *тлеющим разрядом* (рис. 167).

Электрическая дуга. Если сила тока в самостоятельном газовом разряде очень велика, то удары положительных ионов и электронов могут вызвать разогревание катода и анода. С поверхности катода при высокой температуре происходит эмиссия электронов, обеспечивающая поддержание самостоятельного разряда в газе. Длительный самостоятельный электрический разряд в газах, поддерживающийся за счет термоэлектронной эмиссии с катода, называется *дуговым разрядом* (рис. 168).





Коронный разряд. В сильно неоднородных электрических полях, образующихся, например, между острием и плоскостью или между проводом и плоскостью (линия электропередачи), возникает самостоятельный разряд особого вида, называемый *коронным разрядом.* При коронном разряде ионизация электронным ударом происходит лишь вблизи одного из электродов, в области с высокой напряженностью электрического поля.

Применение электрических разрядов. Удары электронов, разгоняемых электрическим полем, приводят не только к ионизации атомов и молекул газа, но и к



возбуждению атомов и молекул, сопровождающемуся излучением света. Световое излучение плазмы самостоятельного электрического разряда широко используется в народном хозяйстве и в быту. Это лампы дневного света и газоразрядные лампы уличного освещения, электрическая дуга в кинопроекционном аппарате и ртутно-кварцевые лампы, применяемые в больницах и поликлиниках.

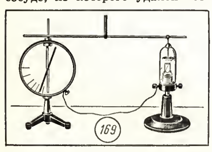
Высокая температура плазмы дугового разряда позволяет применять его для резки и сварки металлических конструкций, для плавки металлов. С помощью искрового разряда ведется обработка деталей из самых твердых материалов.

Электрический разряд в газах бывает и нежелательным явлением, с которым в технике необходимо бороться. Так, например, коронный электрический разряд с проводов высоковольтных линий электропередач приводит к бесполезным потерям электроэнергии. Возрастание этих потерь с увеличением напряжения ставит предел на пути дальнейшего увеличения напряжения в линии электропередач, тогда как для уменьшения потерь энергии на нагревание проводов такое повышение весьма желательно.

50. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

Термоэлектронная эмиссия. Соединим стержень заряженного электрометра с одним электродом вакуумной стеклянной колбы, а корпус электрометра — с другим электродом, представляющим собой тонкую металлическую нить (рис. 169). Опыт покажет, что электрометр не разряжается.

Между двумя электродами, расположенными в герметичном сосуде, из которого удален воз-



дух, и находящимися под напряжением, электрический ток отсутствует, так как в вакууме нет свободных носителей электрического заряда. Американский ученый и изобретатель Томас Эдисон (1847—1931) обнаружил (1879 г.), что в вакуумной стеклянной колбе возникает электрический ток, если один из электродов нагреть до высокой температуры.

Подключим к выводам металлической нити источник тока. Если нить соединена с отрицательным полюсом источника, то при ее нагревании электрометр быстро разряжается. При соединении нити с положительным полюсом электрометр не разряжается и при нагревании нити током. Эти опыты доказывают, что нагретый катод испускает

частицы, обладающие отрицательным электрическим зарядом. Эти частицы — электроны. Явление испускания свободных электронов с поверхности нагретых тел называется *термоэлектронной эмиссией*.

Диод. Термоэлектронная эмиссия используется в различных электронных приборах. Простейший из них — электровакуумный диод. Этот прибор состоит из стеклянного баллона, в котором находятся два электрода: *катод* и *анод*. Анод изготовлен из металлической пластины, катод — из тонкой металлической проволоки, свернутой в спираль. Концы спирали укреплены на металлических стержнях, имеющих два вывода для подключения в электрическую цепь. Соединив выводы катода с источником тока, можно вызвать нагревание проволочной спирали катода проходящим током до высокой температуры. Проволочную спираль, нагреваемую электрическим током, называют нитью накала лампы. Условное обозначение вакуумного диода показано на рисунке 170.

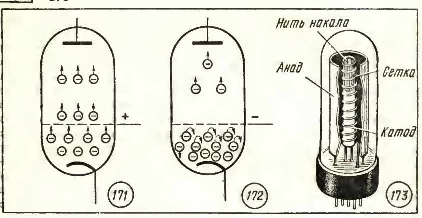
Применение диода. Включив вакуумный диод в электрическую цепь последовательно с источником постоянного тока и

170

амперметром, можно обнаружить основное свойство диода, используемое в различных радиоэлектронных приборах,— одностороннюю проводимость. При подключении источника тока положительным полюсом к аноду и отрицательным к катоду электроны, испускаемые нагретым катодом, движутся под действием электрического поля к аноду — в цепи течет электрический ток. Если подключить источник тока положительным полюсом к катоду, а отрицательным — к аноду, то электрическое поле будет препятствовать движению электронов от катода к аноду — электрического тока в цепи нет. Свойство односторонней проводимости диода используется в радиоэлектронных приборах для преобразования переменного тока в постоянный.

Триод. Потоком электронов, движущихся в электронной лампе от катода к аноду, можно управлять с помощью электрических и магнитных полей. Простейшим электровакуумным прибором, в котором осуществляется управление потоком электронов с помощью электрического поля, является *триод*. Баллон, анод и катод вакуумного триода имеют такую же конструкцию, как и у диода, однако на пути электронов от катода к аноду в триоде располагается третий электрод, называемый *сеткой*. Обычно сетка — это спираль из нескольких витков тонкой проволоки вокруг катода.

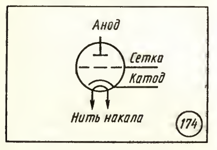
Если на сетку подается положительный потенциал относительно катода (рис. 171), то значительная часть электронов



пролетает от катода к аноду, и в цепи анода существует электрический ток. При подаче на сетку отрицательного потенциала относительно катода электрическое поле между сеткой и катодом препятствует движению электронов от катода к аноду (рис. 172), анодный ток убывает. Таким образом, изменяя напряжение между сеткой и катодом, можно регулировать силу тока в цепи анода.

Устройство вакуумного триода показано на рисунке 173, его условное обозначение на схемах — на рисунке 174.

Электронные пучки и их свойства. Электроны, испускаемые нагретым катодом, можно



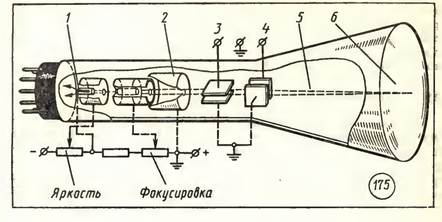
с помощью электрических полей разгонять до высоких скоростей. Пучки электронов, движущихся с большими скоростями, можно использовать для получения рентгеновских лучей, плавки и резки металлов. Способность электронных пучков испытывать отклонения под действием электрических и магнитных полей и вызывать свечение кристаллов используется в электронно-лучевых трубках.

Электронно-лучевая трубка. Если в аноде *2* вакуумного диода сделать отверстие, то часть электронов, испущенных катодом *1*, пролетит сквозь отверстие и образует в пространстве за анодом поток параллельно летящих электронов — электронный луч *5* (рис. 175).

Электровакуумный прибор, в котором используется такой поток электронов, называется *электронно-лучевой трубкой.*

Внутренняя поверхность стеклянного баллона электронно-лучевой трубки против анода покрыта тонким слоем кристаллов,



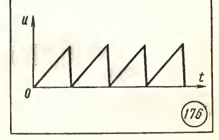


способных светиться при попадании в них быстрых электронов. Эту часть трубки называют экраном (*6*).

С помощью электрических и магнитных полей можно управлять движением электронов на пути от анода до экрана и заставить электроииый луч «рисовать» любую картииу на экране. Эта способность электронного луча используется для создания изображений на экране электроино-лучевой трубки телевизора, называемой кинескопом. Изменение яркости свечения пятна на экране достигается путем управления интенсивностью пучка электронов с помощью дополнительного электрода, расположенного между катодом и анодом и работающего по принципу управляющей сетки электровакуумного триода.

В трубке электронно-лучевого осциллографа между анодом и экраном расположены две пары параллельных металлических пластин. Эти пластины называются отклоняющими пластинами. Подача напряжения на вертикально расположенные пластины *4* вызывает смещение электронного луча в горизонтальном направлении, подача напряжения на горизонтальные пластины *3* вызывает вертикальное отклонение луча. Смещения луча на экране трубки пропорциональны приложениому напряжению, поэтому электронный осциллограф может использоваться в качестве электроизмерительного прибора.

Для исследования быстропеременных электрических процессов в осциллографе осуществляется развертка — равномерное перемещение электронного луча по горизонтали. Для того чтобы луч персмещался вдоль горизон-



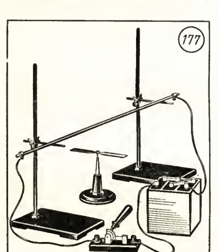
тальной оси с постоянной скоростью, напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах должно изменяться линейно во времени, а для возвращения луча в исходное положение напряжение должно очень быстро падать до нуля. Такая форма напряжения носит название пилообразной (рис. 176).

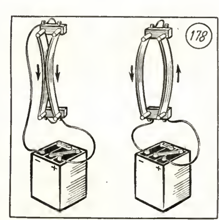
51. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

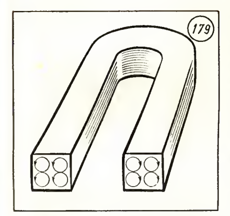
Магнитное взаимодействие. Явления взаимного притяжения разноименных и отталкивания одноименных электрических зарядов во многом сходны с явлениями притяжения разноименных и отталкивания одноименных полюсов магнита. Однако установить связь между электрическими и магнитными явлениями не удавалось.

В 1820 г. датский физик Ханс Эрстед (1777—1851) обнаружил, что магнитная стрелка поворачивается при пропускании электрического тока через проводник, находящийся около нее (рис. 177). В том же году французский физик Андре Ампер (1775—1836) установил, что два проводника, расположенные параллельно друг другу, испытывают взаимное притяжение при пропускании через них электрического тока в одном направлении и отталкиваются, если токи имеют противоположные направления (рис. 178). Явление взаимодействия электрических токов Ампер назвал *электродинамическим взаимодействием.*

На основании своих опытов Ампер пришел к выводу, что взаимодействие тока с магнитом и магнитов между собой можно объяснить, если предположить, что внутри магнита существуют незатухающие молекулярные круговые токи (рис. 179). Тогда все магнитные явления объясняются взаимодействием движущихся электрических зарядов, никаких особых магнитных зарядов в природе нет.







Магнитное поле. Магнитное взаимодействие движущихся электрических зарядов согласно представлениям теории близкодействия объясняется следующим образом. Всякий движущийся электрический заряд создает в окружающем пространстве магнитное поле. Магнитное поле непрерывно в пространстве и действует на другие движущиеся электрические заряды.

Единица силы тока. Прохождение электрического тока может сопровождаться нагреванием и свечением вещества, различными его химическими превращениями, магнитным взаимодействием. Из всех известных действий тока только магнитное взаимодействие сопровождает электрический ток при любых условиях, в любой среде и в вакууме.

Магнитное взаимодействие проводников с током используется в Международной системе для определения единицы силы тока — *ампера* (А).

Ампер — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме, вызывал бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Сила магнитного взаимодействия токов. Сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, называется *силой Ампера*.

Экспериментальное изучение магнитного взаимодействия показывает, что модуль силы Ампера $\vec{F}$ пропорционален длине l проводника с током и зависит от ориентации проводника в магнитном поле.

Магнитная индукция. Для характеристики способности магнитного поля оказывать силовое действие на проводник с током вводится векторная величина — *магнитная индукция* $\vec{B}$.

Силовое действие магнитного поля может обнаруживаться по действию силы Ампера на прямолинейный проводник с током и по вращающему действию на замкнутый контур.

При исследовании магнитного поля с помощью прямолинейного проводника с током магнитная индукция определяется следующим образом: модуль магнитной индукции равен отношению максимального значения модуля силы Ампера $\vec{F}$, действующей на проводник с током, к силе тока I в проводнике и его длине l:

$$B = \frac{F}{Il}. \qquad (51.1)$$

Для определения направления вектора $\vec{B}$ индукции нужно

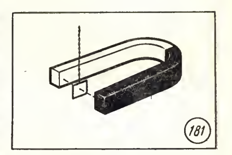
расположнть прямолииейиый проводник в магннтиом поле такнм образом, чтобы снла Ампера имела максимальное зиаченне.

Раскрытую ладоиь левой рукн поместнм в плоскости, проходящей через вектор $\vec{F}$ снлы Ампера н проводиик с током. Четыре пальца левой рукн расположим по направлеиию тока в проводнике, а большой палец, отогнутый в плоскостн ладони под прямым углом к остальным четырем пальцам,— по направлению вектора $\vec{F}$ снлы Ампера. Тогда вектор нидукции $\vec{B}$ будет входнть перпендикулярио в плоскость ладоин (рис. 180).

Едиииця иидукцнн в этом случае определяется как ннлукция такого магнитного поля, в котором на 1 м проводинка прн силе тока 1 А действует максимальиая сила Ампера 1 Н. Эта единица называется *тесла* (Тл) в честь выдающегося югославского электротехинка Н н к о л ы Т е с л а (1856—1943):

$$1\ \text{Тл} = \frac{1\ \text{Н}}{1\ \text{А} \cdot 1\ \text{м}} = 1\ \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

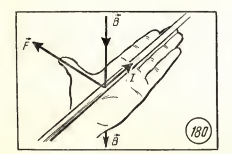
При исследованни магиитного поля с помощью контура с током за иаправление вектора магннтной нндукцин $\vec{B}$ в том месте, где расположена рамка с током, принимают направление перпенднкуляра к плоскости, в которой устаиавливается свободно вращающаяся рамка с током (рнс. 181). Вектор $\vec{B}$ индукции направлен в ту сторону, куда перемещался бы буравчик при вращеинн по направлению тока в рамке (рис. 182).

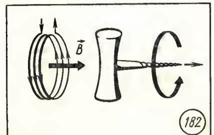


Модуль вектора нндукции $\vec{B}$ равеи отиошенню максимального момента снл M, действующего на рамку с током со стороны магинтного поля, к произведению снлы тока I в рамке иа ее площадь S:

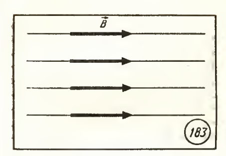
$$B = \frac{M}{IS}. \qquad (51.2)$$

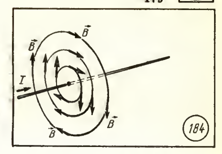
За еднницу магиитной индукцни принята магинтная иидукцня такого поля, в котором иа контур площадью 1 м^2 прн снле тока 1 А действует со стороны











поля максимальный момент сил 1 Н·м. Нетрудно убедиться в том, что эта единица совпадает с единицей, установленной при первом способе определения магнитной индукции:

$$\frac{1\ \text{Н}\cdot\text{м}}{1\ \text{А}\cdot 1\ \text{м}^2}=1\ \frac{\text{Н}}{\text{А}\cdot\text{м}}=1\ \text{Тл}.$$

Линии магнитной индукции. Линия, в любой точке которой вектор магнитной индукции $\vec{B}$ направлен по касательной, называется *линией магнитной индукции*.

Если во всех точках некоторой части пространства вектор индукции магнитного поля имеет одинаковое значение по модулю и одинаковое направление, то магнитное поле в этой части пространства называется однородным (рис. 183).

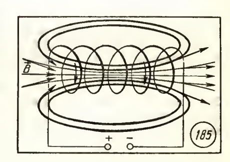
Линии магнитной индукции магнитного поля прямого проводника с током представляют собой окружности, лежащие в плоскостях, перпендикулярных проводнику. Центры окружностей находятся на оси проводника.

Направление вектора магнитной индукции в этом случае определяется следующим правилом. Если смотреть вдоль проводника по направлению тока, т. е. по направлению движения положительных зарядов, то вектор магнитной индукции направлен по ходу часовой стрелки (рис. 184). Если ток направлен к наблюдателю, то вектор магнитной индукции направлен против хода часовой стрелки.

Линии индукции магнитного поля, созданного катушкой с током, показаны на рисунке 185. Вектор магнитной индукции входит в катушку с той стороны, с какой направление тока в витках катушки представляется соответствующим ходу часовой стрелки.

Сила Ампера. Формулу (51.1) можно использовать для определения модуля максимального значения силы Ампера, действующей на прямолинейный проводник с током в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$:

$$F_{\max}=IBl, \qquad (51.3)$$



180

где l — длина проводника; I — сила тока.

Опыт показывает, что при расположении проводника с током под углом α к вектору $\vec{B}$ магнитной индукции для нахождения модуля силы Ампера следует применять выражение

$$F = IBl \sin \alpha. \qquad (51.4)$$

Направление вектора силы Ампера $\vec{F}$ определяется правилом левой руки.

Расположим левую руку так, чтобы четыре пальца указывали направление тока в проводнике. Затем установим ладонь перпендикулярно плоскости, в которой лежат проводник с током и вектор $\vec{B}$ магнитной индукции. Вектор $\vec{B}$ должен входить в ладонь. Тогда отогнутый под прямым углом в плоскости ладони большой палец укажет направление вектора силы Ампера $\vec{F}$ (см. рис. 180).

52. СИЛА ЛОРЕНЦА

Действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы. Действие магнитного поля на проводник с током означает, что магнитное поле действует на движущиеся электрические заряды. Найдем силу, действующую на электрический заряд q при его движении в однородном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$.

Сила тока I в проводнике связана с концентрацией n свободных заряженных частиц, скоростью $\vec{v}$ их упорядоченного движения и площадью S поперечного сечения проводника следующим выражением:

$$I = qnvS, \qquad (52.1)$$

где q — заряд отдельной частицы.

Подставляя уравнение (52.1) в уравнение (51.4), получим

$$F = qnvSlB \sin \alpha.$$

Так как произведение nSl равно числу свободных заряженных частиц в проводнике длиной l

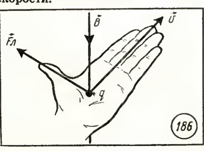
$$N = nSl,$$

то сила, действующая со стороны магнитного поля на одну заряженную частицу, движущуюся со скоростью $\vec{v}$ под углом α к вектору $\vec{B}$ индукции, равна

$$F_л = qvB \sin \alpha. \qquad (52.2)$$

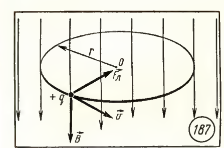
Эту силу называют *силой Лоренца*.

Направление вектора силы Лоренца $\vec{F}_л$ определяется правилом левой руки, в нем за направление тока нужно брать направление вектора скорости положительного заряда (рис. 186). Для случая движения отрицательно заряженных частиц четыре пальца следует располагать противоположно направлению вектора скорости.









Движение заряженных частиц в магнитном поле. В однородном магнитном поле на заряженную частицу, движущуюся со скоростью $\vec{v}$ перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, действует сила $\vec{F}_л$, постоянная по модулю и направленная перпендикулярно вектору скорости $\vec{v}$ (рис. 187). В вакууме под действием силы Лоренца $\vec{F}_л$ частица приобретает центростремительное ускорение

$$a=\frac{F_л}{m}=\frac{qBv}{m} \qquad (52.3)$$

и движется по окружности. Радиус r окружности, по которой движется частица, определяется из условия

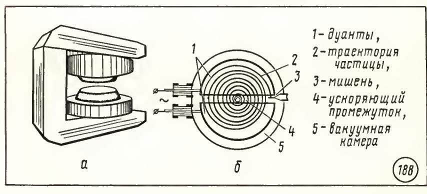
$$\frac{qBv}{m}=\frac{v^2}{r}, \; r=\frac{mv}{qB}. \qquad (52.4)$$

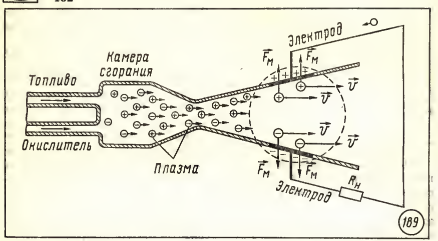
Период обращения частицы в однородном магнитном поле равен

$$T=\frac{2\pi r}{v}=\frac{2\pi m}{qB}. \qquad (52.5)$$

Последнее выражение показывает, что период обращения частицы в однородном магнитном поле при постоянной массе не зависит от скорости v и радиуса r траектории ее движения. Этот факт используется, например, в ускорителе заряженных частиц — циклотроне.

Циклотрон. В этом ускорителе заряженные частицы — протоны, ядра атомов гелия — разгоняются переменным электрическим полем постоянной частоты в вакууме в зазоре между двумя металлическими электродами — дуантами. Дуанты находятся между полюсами постоянного электромагнита (рис. 188, *а*). Под действием магнитного поля внутри дуантов заряженные частицы движутся по окружности. К моменту времени, когда они совершают половину оборота и подходят к зазору между дуантами, направление вектора напряженности электрического поля между дуантами изменяется на противоположное и частицы





вновь испытывают ускореиие. Каждую следующую половину оборота частицы пролетают по окружности все большего радиуса (рис. 188, *б*), но период их обращения остается неизменным. Поэтому для ускорения частиц на дуанты подается переменное иапряжеиие с постоянным периодом.

Ускорение частиц в циклотроне с постояиным периодом возможно лишь до значений скоростей, значительно меньших скорости света. С приближением скорости частицы к скорости света в вакууме, равной $c = 300\ 000$ км/с, масса частицы возрастает, вследствие чего увеличивается период ее обращения в магнитном поле. Равенство периода обращения частицы и периода изменения электрического поля нарушается, ускорение прекращается.

МГД-генератор. Действие магнитного поля на движущиеся электрические заряды плазмы используется для получения электроэнергии. Установка для магнитогидродииамического преобразования иазывается МГД-генератором.

Схема устройства МГД-генератора показаиа на рисуике 189. В камере сгораиия при сжигании иефти, керосина или природного газа создается высокая температура (2000—3000 К), при которой газообразиые продукты сгорания ионизируются, образуя электронно-иоиную плазму. Для повышения электропроводиости плазмы в камеру сгораиия вводят легкоионизирующиеся вещества, содержащие кальций, натрий, цезий. Раскаленная плазма движется по расширяющемуся каналу в несколько метров, в котором ее внутренняя эиергия превращается в кииетическую энергию, и скорость возрастает до 2000 м/с и более. Так же, как и металлический проводник, плазма в целом иейтральна, но, влетая в область сильного магнитного поля, составляющие ее частицы разных знаков под действием силы Лоренца $\vec{F}_л$ разделяются, как показано на рисунке 189. Электроны, достигнув



нижнего электрода, движутся во внешней цепи по нагрузке сопротивлением $R_{\text{Н}}$ к другому электроду, где нейтрализуют положительные ионы. Мощность, выделяемая во внешней цепи, может быть использована для различных практических нужд.

В режиме холостого хода, когда внешняя цепь разомкнута, между электродами возникает наибольшая разность потенциалов, равная ЭДС. В зависимости от конструкции генератора она может достигать нескольких сотен или тысяч вольт.

В МГД-генераторе сильно нагрета только плазма и отсутствуют движущиеся детали, подвергаемые подобно лопаткам турбин одновременному воздействию больших механических напряжений и высоких температур. Возможность использовать огнеупорные материалы и применять охлаждение неподвижных металлических деталей, соприкасающихся с плазмой, позволяет повысить температуру рабочего тела, а значит, и КПД установки. Для температуры плазмы, равной на входе $T_1 = 2500$ К, а на выходе $T_2 = 300$ К, теоретическое значение КПД составляет примерно 90%. Однако в реальных условиях температура отработанных газов на выходе из канала больше 300 К. Но если отработанные и уже не ионизированные продукты сгорания использовать для получения пара и приведения в действие турбины обычного электромашинного генератора, то реальный КПД такой установки будет равен 50—60%. А это почти вдвое превышает реальный КПД тепловых электростанций. Следовательно, при том же расходе топлива с помощью МГД-генератора можно получить вдвое больше электроэнергии.

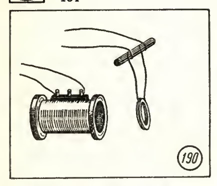
Первая опытно-промышленная электростанция У-25 с МГД-генератором мощностью 25 МВт была запущена в нашей стране в 1971 г.

На Рязанской ГРЭС начато строительство МГД-генератора мощностью 500 МВт на газомазутном топливе.

Коэффициент полезного действия энергоблока приближается к 50%. Это должно обеспечить экономию 20—25% топлива по сравнению с обычной тепловой электростанцией.

53. ВЕЩЕСТВО В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ферромагнетизм. Электростатическое взаимодействие неподвижных зарядов зависит от свойств среды, в которой находятся заряды. Опыт показывает, что от свойств среды зависит и магнитное взаимодействие токов. Если около большой катушки подвесить на двух тонких проводах вторую небольшую катушку (рис. 190), то при подключении катушек к источнику тока наблюдается отклонение малой катушки от вертикального положения. При внесении в большую катушку железного стержня малая катушка отклоняется на больший угол. Увеличение силы Ам-



пера, действующей на малую катушку, показывает, что индукция магнитного поля, создаваемого током в большой катушке, увеличивается при внесении в катушку железного сердечника. Вещества, которые значительно усиливают внешнее магнитное поле, называются *ферромагнетиками*. Кроме железа, к ферромагнетикам относятся, например, никель, кобальт и некоторые соединения этих металлов с другими элементами.

Магнитная проницаемость. Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция $\vec{B}$ магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции $\vec{B}_0$ магнитного поля в вакууме, называется *магнитной проницаемостью*:

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \qquad (53.1)$$

У ферромагнетиков значения магнитной проницаемости достигают нескольких десятков, сотен и даже тысяч единиц.

Парамагнетики и диамагнетики. При внесении в катушку стержней из меди, алюминия, стекла, фарфора, дерева не удается заметить изменения отклонения малой катушки. Однако эксперименты с применением более чувствительных приборов позволяют установить, что все вещества изменяют магнитное поле. По характеру производимых изменений внешнего магнитного поля неферромагнитные вещества делятся на *парамагнетики* и *диамагнетики*.

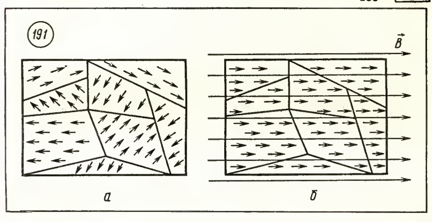
Парамагнетиками называются вещества, которые создают слабое магнитное поле, по направлению совпадающее с внешним полем.

Магнитная проницаемость даже наиболее сильных парамагнетиков мало отличается от единицы: 1,00036 — у платины и 1,0034 — у жидкого кислорода.

Диамагнетиками называются вещества, которые создают поле, ослабляющее внешнее магнитное поле. Диамагнитными свойствами обладают, например, серебро, свинец, кварц. Магнитная проницаемость диамагнетиков отличается от единицы не более чем на десятитысячные доли. Самый сильный из диамагнетиков — висмут — обладает магнитной проницаемостью, равной 0,999824.

Природа ферромагнетизма. Ферромагнетизм объясняется магнитными свойствами электронов. Электрон эквивалентен круговому току или вращающемуся заряженному телу и поэтому обладает собственным магнитным полем. В большинстве кристаллов магнитные поля электронов взаимно компенсируются благодаря попарной антипараллельной ориентации магнитных полей электронов. Лишь в некоторых кристаллах, например в кристаллах железа, возникают условия





для параллельной ориентации собственных магнитных полей электронов. В результате этого внутри кристалла ферромагнетика возникают намагниченные области протяженностью 10^{-2}—10^{-4} см. Эти самопроизвольно намагниченные области называются *доменами* (рис. 191, *а*). В отдельных доменах магнитные поля имеют различные направления и в большом кристалле взаимно компенсируют друг друга. При внесении ферромагнитного образца во внешнее магнитное поле происходит упорядочение ориентации магнитных полей отдельных доменов.

С увеличением магнитной индукции $\vec{B}$ внешнего поля возрастает степень упорядоченности ориентации отдельных доменов — магнитная индукция $\vec{B}$ возрастает. При некотором значении индукции внешнего поля наступает полное упорядочение ориентации доменов (рис. 191, *б*), возрастание магнитной индукции прекращается. Это явление называется *магнитным насыщением*.

Постоянные магниты. При вынесении ферромагнитного образца из внешнего магнитного поля значительная часть доменов сохраняет упорядоченную ориентацию — образец становится *постоянным магнитом*. Для изготовления постоянных магнитов используются сталь, сплавы железа с алюминием, никелем и кобальтом, оксиды железа и некоторых других металлов.

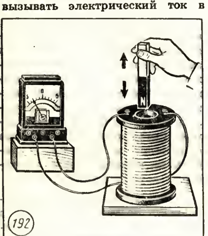
Температура Кюри. Упорядоченность ориентации доменов в ферромагнетике нарушается тепловыми колебаниями атомов в кристалле. Чем выше температура кристалла, тем быстрее разрушается порядок в ориентации доменов, вследствие чего образец размагничивается. Температура, выше которой вещество перестает быть ферромагнетиком, называется *температурой Кюри*. Температура Кюри у железа 770 °С, у кобальта 1130 °С, у никеля 356 °С. Исчезновение ферромагнитных свойств у железа при высокой температуре можно наблюдать в опыте с лезвием брит-

вы, которое при нагревании пламенем отпадает от магнита.

Применение ферромагнитных материалов. Ферромагнитные материалы, способные усиливать магнитные поля в десятки тысяч раз, широко применяются в современной технике. Стальной сердечник является одной из основных деталей электрогенератора и электродвигателя, электромагнита и трансформатора. Тонкий слой ферромагнитного порошка на гибкой пленке используется для магнитной записи и воспроизведения звука.

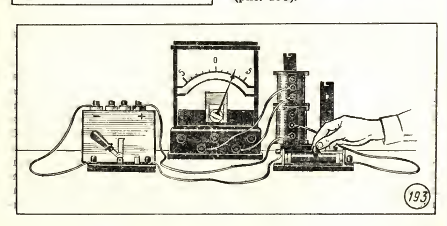
54. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Если электрический ток, как показали опыты Эрстеда, создает магнитное поле, то не может ли в свою очередь магнитное поле вызывать электрический ток в проводнике? Многие ученые с помощью опытов пытались найти ответ на этот вопрос, но первым решил эту задачу Майкл Фарадей (1791—1867).



В 1831 г. Фарадей обнаружил, что в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного поля возникает электрический ток. Этот ток назвали *индукционным током.*

Индукционный ток в катушке из металлической проволоки возникает при вдвигании магнита внутрь катушки и при выдвигании магнита из катушки (рис. 192), а также при изменении силы тока во второй катушке, магнитное поле которой пронизывает первую катушку (рис. 193).





Явление возникновения электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменениях магнитного поля, пронизывающего контур, называется *электромагнитной индукцией.*

Появление электрического тока в замкнутом контуре при изменениях магнитного поля, пронизывающего контур, свидетельствует о действии в контуре сторонних сил неэлектростатической природы или о возникновении *ЭДС индукции.* Количественное описание явления электромагнитной индукции дается на основе установления связи между ЭДС индукции и физической величиной, называемой *магнитным потоком.*

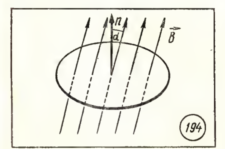
Магнитный поток. Для плоского контура, расположенного в однородном магнитном поле (рис. 194), магнитным потоком Ф через поверхность площадью S называют величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции $\vec{B}$ на площадь S и на косинус угла α между вектором $\vec{B}$ и нормалью к поверхности:

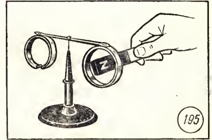
$$\Phi = BS \cos \alpha. \qquad (54.1)$$

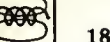
Правило Ленца. Опыт показывает, что направление индукционного тока в контуре зависит от того, возрастает или убывает магнитный поток, пронизывающий контур, а также от направления вектора индукции магнитного поля относительно контура. Общее правило, позволяющее определить направление индукционного тока в контуре, было установлено в 1833 г. Э. Х. Ленцем.

Правило Ленца можно наглядно показать с помощью легкого алюминиевого кольца (рис. 195). Опыт показывает, что при внесении постоянного магнита кольцо отталкивается от него, а при удалении притягивается к магниту. Результат опытов не зависит от полярности магнита.

Отталкивание и притяжение сплошного кольца объясняется возникновением индукционного тока в кольце при изменениях магнитного потока через кольцо и действием на индукционный ток магнитного поля. Очевидно, что при вдвигании магнита в кольцо индукционный ток в нем имеет такое направление, что созданное этим током магнитное поле противодействует внешнему магнитному полю, а при выдвигании магнита индукционный ток в нем имеет такое направление,







что вектор индукции его магнитного поля совпадает по направлению с вектором индукции внешнего поля.

Общая формулировка *правила Ленца:* **возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через площадь, ограниченную контуром, стремится компенсировать то изменение магнитного потока, которым вызывается данный ток.**

Закон электромагнитной индукции. Экспериментальное исследование зависимости ЭДС индукции от изменения магнитного потока привело к установлению *закона электромагнитной индукции:* **ЭДС индукции в замкнутом контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.**

В СИ единица магнитного потока выбрана такой, чтобы коэффициент пропорциональности между ЭДС индукции и изменением магнитного потока был равен единице. При этом *закон электромагнитной индукции* формулируется следующим образом: **ЭДС индукции в замкнутом контуре равна модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:**

$$|\mathscr{E}_i| = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right|. \qquad (54.2)$$

С учетом правила Ленца закон электромагнитной индукции записывается следующим образом:

$$\mathscr{E}i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (54.3)$$

ЭДС индукции в катушке. Если в последовательно соединенных контурах происходят одинаковые изменения магнитного потока, то ЭДС индукции в них равна сумме ЭДС индукции в каждом из контуров. Поэтому при изменении магнитного потока в катушке, состоящей из n одинаковых витков провода, общая ЭДС индукции в n раз больше ЭДС индукции в одиночном контуре:

$$\mathscr{E}_i = -n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (54.4)$$

Единица магнитного потока. Единица магнитного потока в Международной системе единиц называется *вебером* (Вб). Она определяется на основании использования закона электромагнитной индукции. Магнитный поток через площадь, ограниченную замкнутым контуром, равен 1 Вб, если при равномерном убывании этого потока до нуля за 1 с в контуре возникает ЭДС индукции 1 В:

$$\Delta\Phi = \mathscr{E}_i\Delta t, \quad 1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}.$$

Для однородного магнитного поля на основании уравнения (54.1) следует, что его магнитная индукция равна 1 Тл, если магнитный поток через контур площадью 1 м^2 равен 1 Вб:

$$B = \frac{\Phi}{S},$$

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ м}^2} = 1 \text{ Вб} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Вихревое электрическое поле. Закон электромагнитной индукции (54.3) по известной скорости изменения магнитного потока



позволяет найти значение ЭДС индукции в контуре и при известном значении электрического сопротивления контура вычислить силу тока в контуре. Однако при этом остается нераскрытым физический смысл явления электромагнитной индукции. Рассмотрим это явление подробнее.

Возникновение электрического тока в замкнутом контуре свидетельствует о том, что при изменении магнитного потока, пронизывающего контур, на свободные электрические заряды в контуре действуют силы. Провод контура неподвижен, неподвижными можно считать свободные электрические заряды в нем. На неподвижные электрические заряды может действовать только электрическое поле. Следовательно, при любом изменении магнитного поля в окружающем пространстве возникает электрическое поле. Это электрическое поле и приводит в движение свободные электрические заряды в контуре, создавая индукционный электрический ток. Электрическое поле, возникающее при изменениях магнитного поля, называют *вихревым электрическим полем.*

Работа сил вихревого электрического поля по перемещению электрических зарядов и является работой сторонних сил, источником ЭДС индукции.

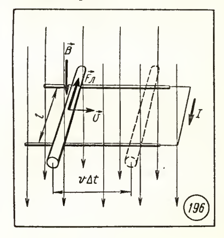
Вихревое электрическое поле отличается от электростатического поля тем, что оно не связано с электрическими зарядами, его линии напряженности представляют собой замкнутые линии. Работа сил вихревого электрического поля при движении электрического заряда по замкнутой линии может быть отлична от нуля.

ЭДС индукции в движущихся проводниках. Явление электромагнитной индукции наблюдается и в тех случаях, когда магнитное поле не изменяется во времени, но магнитный поток через контур изменяется из-за движения проводников контура в магнитном поле. В этом случае причиной возникновения ЭДС индукции является не вихревое электрическое поле, а сила Лоренца.

Рассмотрим прямоугольный контур в однородном магнитном поле, вектор индукции $\vec{B}$ которого перпендикулярен плоскости контура. Если провод скользит с постоянной скоростью $\vec{v}$ по двум проводникам контура (рис. 196), то за время Δt площадь контура изменяется на величину $\Delta S = -lv\Delta t$, а магнитный поток через контур — на

$$\Delta\Phi = -Blv\Delta t.$$

Поэтому ЭДС индукции в контуре будет равна



$$\mathscr{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = vBl. \quad (54.5)$$

В проводнике, движущемся в магнитном поле, на электрический заряд q действует сила Лоренца:

$$F_л = qvB.$$

Вычислим работу силы Лоренца, действующей на электрический заряд q во время полного обхода контура.

На пути длиной l работа силы Лоренца равна

$$A = F_л l = qvBl. \quad (54.6)$$

В неподвижных частях контура сила Лоренца равна нулю, поэтому полная работа силы Лоренца при обходе контура зарядом q равна работе силы Лоренца на движущемся участке контура.

Рассматривая работу силы Лоренца как работу сторонних сил в контуре, мы получим выражение для ЭДС сторонних сил:

$$\mathscr{E} = \frac{A}{q} = vBl. \quad (54.7)$$

Совпадение выражений (54.5) и (54.7) показывает, что причиной возникновения ЭДС индукции в контуре в этом случае является действие силы Лоренца на заряды в движущемся проводнике.

55. САМОИНДУКЦИЯ

Индуктивность. Электрический ток, проходящий по проводнику, создает вокруг него магнитное поле. Магнитный поток Ф через контур из этого проводника пропорционален модулю индукции $\vec{B}$ магнитного поля внутри контура, а индукция магнитного поля в свою очередь пропорциональна силе тока в проводнике. Следовательно, магнитный поток через контур прямо пропорционален силе тока в контуре:

$$\Phi = LI. \quad (55.1)$$

Коэффициент пропорциональности L между силой тока I в контуре и магнитным потоком Ф, создаваемым этим током, называется *индуктивностью*. Индуктивность зависит от размеров и формы проводника, от магнитных свойств среды, в которой находится проводник.

Единица индуктивности. За единицу индуктивности в Международной системе принимается *генри* (Гн). Эта единица определяется на основании формулы (55.1):

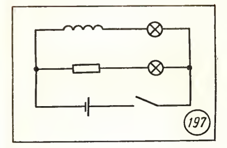
$$L = \frac{\Phi}{I}. \quad (55.2)$$

Индуктивность контура равна 1 Гн, если при силе постоянного тока 1 А магнитный поток через контур равен 1 Вб:

$$1\ \text{Гн} = \frac{1\ \text{Вб}}{1\ \text{А}}.$$

Самоиндукция. При изменении силы тока в катушке происходит изменение магнитного потока, создаваемого этим током. Изменение магнитного потока, пронизывающего катушку, должно вызывать появление ЭДС индукции в катушке. Явление возникновения ЭДС индукции в





электрической цепи в результате изменения силы тока в этой цепи называется *самоиндукцией*.

В соответствии с правилом Ленца ЭДС самоиндукции препятствует нарастанию силы тока при включении и убыванию силы тока при выключении цепи.

Явление самоиндукции можно наблюдать, собрав электрическую цепь из катушки с большой индуктивностью, резистора, двух одинаковых ламп накаливания и источника тока (рис. 197). Резистор должен иметь такое же электрическое сопротивление, как и провод катушки. Опыт показывает, что при замыкании цепи электрическая лампа, включенная последовательно с катушкой, загорается несколько позже, чем лампа, включенная последовательно с резистором. Нарастанию тока в цепи катушки при замыкании препятствует ЭДС самоиндукции, возникающая при возрастании магнитного потока в катушке. При отключении источника тока вспыхивают обе лампы. В этом случае ток в цепи поддерживается ЭДС самоиндукции, возникающей при убывании магнитного потока в катушке.

ЭДС самоиндукции $\mathscr{E}_{is}$, возникающая в катушке с индуктивностью L, по закону электромагнитной индукции равна

$$\mathscr{E}_{is} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t},$$

или

$$\mathscr{E}_{is} = -LI'. \qquad (55.3)$$

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в катушке.

Используя выражение (55.3), можно дать второе определение единицы индуктивности: элемент электрической цепи обладает индуктивностью в 1 Гн, если при равномерном изменении силы тока в цепи на 1 А за 1 с в нем возникает ЭДС самоиндукции 1 В.

Энергия магнитного поля. При отключении катушки индуктивности от источника тока лампа накаливания, включенная параллельно катушке, дает кратковременную вспышку. Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции. Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.

Энергию магнитного поля катушки индуктивности можно вычислить следующим способом. Для упрощения расчета рассмотрим такой случай, когда после отключения катушки от источника ток в цепи убывает со временем по линейному закону. В этом случае ЭДС самоиндукции имеет постоянное значение, равное

$$\mathscr{E}_{is} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} = L\frac{I}{t}, \qquad (55.4)$$

где t — промежуток времени, за который сила тока в цепи убывает от начального значения I до 0.

За время t при линейном убывании силы тока от I до 0 в цепи проходит электрический заряд:

$$q = I_{ср} t = \frac{I}{2} t, \qquad (55.5)$$

поэтому работа электрического тока равна

$$A = q\mathscr{E}_{is} = \frac{It}{2} \cdot \frac{LI}{t} = \frac{LI^2}{2} \qquad (55.6)$$

Эта работа совершается за счет энергии магнитного поля катушки.

Энергия $W_м$ магнитного поля катушки индуктивности равна половине произведения ее индуктивности на квадрат силы тока в ней:

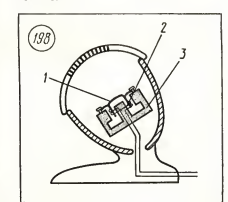
$$W_м = \frac{LI^2}{2}. \qquad (55.7)$$

56. МАГНИТНАЯ ЗАПИСЬ ИНФОРМАЦИИ

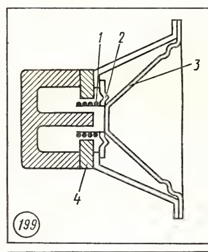
Микрофон и громкоговоритель. Наиболее привычный для каждого человека способ обмена информацией — это речь. При обмене информацией с помощью речи один человек возбуждает звуковые колебания в воздухе с помощью голосовых связок, другой воспринимает эти колебания с помощью органов слуха.

Первыми шагами к созданию современных способов записи и воспроизведения звука было изобретение микрофона и громкоговорителя. Микрофоном называется прибор для преобразования звуковых колебаний в электрические.

Изменения давления, происходящие при распределении звуковых волн в воздухе, позволяют использовать для их объективной регистрации и изучения электродинамический микрофон. В электродинамическом микрофоне имеется тонкая и гибкая мембрана *1*, к которой приклеена легкая проволочная катушка *2*. Катушка расположена в кольцевом зазоре между полюсами постоянного магнита *3* (рис. 198). Колебания давления воздуха, возникающие при прохождении звуковой волны, вызывают колебания мембраны микрофона и соединенной с ней проволочной катушки. Колебания катушки в магнитном поле постоянного магнита приводят к возникновению переменной ЭДС индукции. Таким образом в электродинамическом микрофоне происходит преобразование звуковых колебаний в электрические.







Для обратного преобразования электрических колебаний в звуковые применяется громкоговоритель. В громкоговорителе катушка *1* (рис. 199) из медного провода соединена с гибкой мембраной *2* и коническим диффузором *3*. Катушка находится в магнитном поле постоянного магнита *4*. При протекании переменного тока катушка под действием переменной силы Ампера колеблется с частотой колебаний силы тока. Катушка заставляет колебаться с такой же частотой мембрану и диффузор. Эти коле-



бания создают колебания давления воздуха, т. е. звуковые волны.

Магнитная запись и воспроизведение звука. Одним из наиболее распространенных способов сохранения и последующего воспроизведения звуков речи и музыки является магнитная запись. Магнитная запись основана на свойстве ферромагнетиков сохранять остаточное намагничивание после снятия внешнего магнитного поля. Запись звука в магнитофонах производится на тонкую пластмассовую ленту, покрытую слоем порошка ферромагнитного материала. Колебания воздуха в звуковой волне преобразуются с помощью микрофона *М* в колебания силы тока в электрической цепи (рис. 200). После усиления переменный ток звуковой частоты поступает в обмотку кольцевого магнита магнитной головки *ГЗ*. При протягивании магнитной ленты около зазора между полюсами кольцевого электромагнита различные участки ленты намагничиваются в соответствии с изменениями силы тока в обмотке. Полоса на ленте, намагниченная в процессе записи, называется дорожкой.

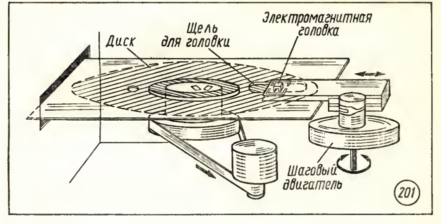
Для воспроизведения записи магнитная лента протягивается перед зазором кольцевого магнита магнитной головки воспроизведения *ГВ* с той же скоростью, с которой она протягивалась при записи. При движении намагниченной ленты происходят изменения магнитного поля в кольцевом электромагните — в обмотке электромагнита возникает переменный ток. После усиления переменного напряжения усилителем воспроизведения *УВ* напряжение звуковой частоты подводится к катушке громкоговорителя *Гр*. Переменный ток в катушке громкоговорителя вызывает колебания катушки в магнитном поле постоянного магнита. Прикрепленный к катушке диффузор воспроизводит звук.

Для стирания ненужной записи с ленты служит магнитная головка стирания записи *ГС*. К ее обмотке подводится переменное напряжение от генератора ультразвуковой частоты *ГУЗЧ*. В бытовых магнитофонах при записи и воспроизведении обычно используются одна и та же универсальная головка и один усилитель.

Видеозапись. На магнитную ленту может быть записан не только сигнал звуковой частоты, но и сигнал для управления электронным лучом кинескопа телевизора. На магнитную ленту видеомагнитофона записывается информация об изображении в каждой точке экрана телевизора и звуковом сопровождении. При считывании записи с ленты с помощью магнитных головок на экране телевизора получается изображение и динамик воспроизводит звуковое сопровождение изображения.

Магнитная память ЭВМ. Для работы ЭВМ необходим обмен информацией с внешними устройствами. Так как вся информация для компьютера представляет собой набор сигналов типа «да» или «нет», эта информация может быть записана на магнитную ленту или магнитный диск в виде чередующихся участков с различной полярностью намагничивания.





В персональных компьютерах для записи информации используется тонкий пластмассовый диск, покрытый слоем магнитного материала. Запись и считывание производятся с помощью электромагнитной головки, перемещающейся над поверхностью диска по его радиусу (рис. 201). Диск вращается со скоростью 300 оборотов в минуту, запись производится на концентрических дорожках, продольная плотность записи информации достигает 275 бит/мм, поперечная плотность — до 60 дорожек на 1 мм по радиусу. Полная емкость записи информации на одной стороне диска диаметром 133 мм достигает 500 Кбайт.

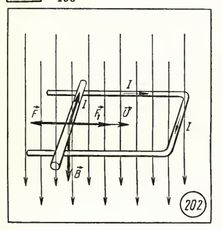
57. МАШИНА ПОСТОЯННОГО ТОКА

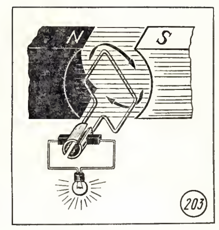
Превращение механической энергии в электрическую. Явление возникновения электрического тока при движении проводника в магнитном поле широко используется в электрических генераторах. При движении проводника длиной l в магнитном поле перпендикулярно вектору индукции $\vec{B}$ в нем под действием ЭДС индукции возникает электрический ток I. На проводник с током действует сила Ампера $\vec{F}$.

Применив правило левой руки, можно убедиться, что направление вектора $\vec{F}$ силы Ампера противоположно направлению вектора $\vec{v}$ скорости движения проводника (рис. 202). Следовательно, для равномерного движения проводника к нему должна быть приложена внешняя сила $\vec{F}_1$, равная по модулю силе Ампера $\vec{F}$, но направленная в противоположную сторону: $\vec{F}_1 = -\vec{F}$. Эта сила при перемещении проводника на расстояние $\Delta l = v\Delta t$ совершает работу, равную

$$A = F_1\Delta l = IBl\Delta l =$$

$$= \frac{q}{\Delta t}\cdot B\Delta S = q\,\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = q\mathscr{E}_i. \quad (57.1)$$





Мы получили, что работа внешних сил, вызывающих движение проводника в магнитном поле, равна работе ЭДС индукции в электрической цепи.

Машина постоянного тока как электрический генератор. Физический принцип действия машины постоянного тока как генератора основан на явлении возникновения ЭДС индукции в рамке из проводника при вращении ее в магнитном поле (рис. 203).

Основными частями машины постоянного тока являются *индуктор*, с помощью которого создается магнитное поле, *якорь*, в обмотке которого наводится ЭДС индукции, *коллектор* и *электрические щетки*. Коллектором называются изолированные друг от друга проводящие пластины, присоединенные к катушкам. По пластинам коллектора скользят электрические щетки, соединяющие концы обмоток с внешней электрической цепью.

Если индуктор в машине постоянного тока неподвижен и является в этом случае *статором* машины, то якорь вращается и является *ротором* машины.

Якорь имеет стальной сердечник цилиндрической формы, концы обмоток якоря присоединены к пластинам коллектора.

При вращении якоря в магнитном поле индуктора в проводах его обмоток возникает ЭДС индукции.

С потребителями электрической энергии через скользящие контакты коллектора и электрических щеток соединяются концы той обмотки якоря, в которой в данный момент времени ЭДС индукции имеет максимальное значение.

Провода обмотки движутся перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. При этом между концами проводника возникает ЭДС индукции, которая прямо пропорциональна скорости $\vec{v}$ движения проводника в маг-



нитном поле, длине проводника l и индукции $\vec{B}$ магнитного поля. Поэтому на концах разомкнутой обмотки, содержащей N витков, напряжение будет равно

$$U = 2NvBl. \qquad (57.2)$$

Так как линейная скорость v движения проводника связана с частотой ν вращения ротора и его радиусом R выражением

$$v = 2\pi R\nu,$$

то формулу (57.2) следует записать

$$U = 4\pi RN\nu Bl. \qquad (57.3)$$

Так как площадь рамки равна $S = 2Rl$, а магнитный поток Φ можно определить как $\Phi = BS$, то напряжение на выходе генератора равно

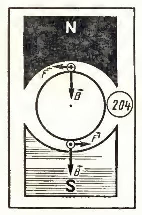
$$U = 2\pi N\nu\Phi. \qquad (57.4)$$

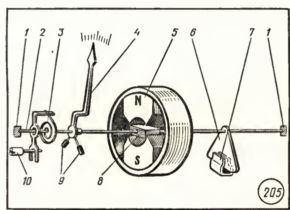
Машина постоянного тока как электродвигатель. Замечательной особенностью машины постоянного тока является ее обратимость, т. е. возможность использования одной и той же машины как для преобразования механической энергии в электрическую, так и для преобразования электрической энергии в механическую.

Для использования машины постоянного тока в качестве электродвигателя через обмотку индуктора пропускают постоянный ток.

При подключении к щеткам постоянного напряжения возникает электрический ток в обмотке якоря и на провода обмотки со стороны магнитного поля действует сила Ампера $\vec{F}$.

В проводах обмотки, расположенных на противоположных сторонах якоря, направления сил Ампера противоположны друг другу, и под действием этих сил якорь приходит во вращение (рис. 204). Электродвигатель может использоваться для приведе-





Формулы

Закон сохранения электрического заряда

$$q_1+q_2+\ldots+q_n=\text{const}.$$

Закон Кулона

$$F_э=k\frac{|q_1|\,|q_2|}{r^2}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{|q_1|\,|q_2|}{r^2}.$$

Напряженность электрического поля точечного заряда

$$\vec{E}=\frac{\vec{F}_э}{q_1};\qquad E=k\frac{|q|}{r^2};\qquad \vec{E}=\vec{E}_1+\vec{E}_2.$$

Напряжение

$$U=\frac{A}{q};\qquad U=Ed;\qquad E=\frac{U}{d}.$$

Электроемкость

$$C=\frac{q}{U}.$$

ЭДС

$$\mathscr{E}=\frac{A_{\text{стор}}}{q}.$$

Сила тока

$$\underset{\Delta t\to 0}{I}=\frac{\Delta q}{\Delta t}=q'.$$

Закон Ома

$$I=\frac{U}{R};\qquad I=\frac{\mathscr{E}}{R+r}.$$

Закон электролиза

$$m=k\Delta q=kI\Delta t;\qquad e=\frac{F}{N_А};\qquad k=\frac{M}{neN_А}.$$

Магнитная индукция

$$B=\frac{F_{\max}}{Il}=\frac{M_{\max}}{IS}.$$

Сила Ампера

$$F=IBl\sin\alpha.$$

Сила Лоренца

$$F_Л=qvB\sin\alpha.$$

Магнитный поток

$$\Phi=BS\cos\alpha.$$

Закон электромагнитной индукции

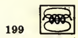
$$\underset{\Delta t\to 0}{\mathscr{E}i}=-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Индуктивность

$$L=\frac{\Phi}{I}.$$

ЭДС самоиндукции

$$\underset{\Delta t\to 0}{\mathscr{E}_{is}}=-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=-L\frac{\Delta I}{\Delta t}=-LI'.$$



	Обозначения	Единицы и значения величин
	q — электрический заряд	1 Кл
	$F_э$ — модуль силы электростатического взаимодействия	1 Н $k = 9 \cdot 10^9$ Н·м²/Кл²
	ε_0 — электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²)
	$\vec{E}$ — напряженность электрического поля	1 Н/Кл или 1 В/м
	U — напряжение	1 В
	C — электроемкость	1 Ф
	I — сила тока	1 А
	R — электрическое сопротивление	1 Ом
	r — внутреннее сопротивление источника тока	1 Ом
	$\mathscr{E}$ — электродвижущая сила источника тока (ЭДС)	1 В
	$A_{ст}$ — работа сторонних сил	1 Дж
	k — электрохимический эквивалент вещества	1 кг/Кл
	F — постоянная Фарадея	$F = 96\,500$ Кл/моль
	e — заряд электрона	$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл
	$\vec{B}$ — магнитная индукция	1 Тл
	$\mathscr{E}_i$ — ЭДС индукции	1 В
	Φ — магнитный поток	1 Вб
	L — индуктивность	1 Гн



ния в движение колес электровоза, троллейбуса, трамвая, автобуса.

С помощью электродвигателя постоянного тока — стартера — производится запуск двигателя автомобиля. Например, рабочее напряжение стартера автомобиля «Жигули» — 12 В, сила тока в обмотке при максимальной мощности — 260 А, скорость вращения якоря — 1800 об/мин.

58. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Действие магнитного поля на проводник с током используется в электроизмерительных приборах магнитоэлектрической системы. Измеряемый электрический ток пропускается через рамку 8, помещенную в магнитное поле постоянного магнита 5 (рис. 205). Рамка укреплена на оси *2*.

Для уменьшения силы трения стальная ось *2* опирается на подпятники *1*, изготовленные из синтетического агата, рубина или корунда.

При пропускании электрического тока через рамку сначала момент сил Ампера, вызывающий поворот рамки и связанной с ней подвижной части измерительной системы, превосходит момент сил упругости пружин *3*, препятствующих повороту. Поэтому подвижная часть вращается с ускорением и к моменту достижения угла поворота, при котором наступает равенство моментов сил, приобретает запас кинетической энергии вращательного движения. За счет этой энергии подвижная система проходит положение равновесия, затем ее движение постепенно замедляется под действием возвращающих пружин. После остановки подвижная система под действием сил упругости совершает поворот в обратную сторону и т. д. Таким образом, подвижная система не сразу останавливается, а совершает затухающие колебания относительно положения равновесия. Для устранения этих колебаний в приборах применяются специальные успокоители. В них для торможения подвижной системы используется тонкая алюминиевая пластина *6*, помещенная между полюсами постоянного магнита *7* и закрепленная на оси вращения подвижной системы. При повороте подвижной системы алюминиевая пластина успокоителя движется в поле постоянного магнита. Наводимые в ней при этом индукционные токи тормозят движение пластины и вместе с тем вращение всей подвижной системы электроизмерительного прибора.

Для того чтобы при любом положении указательной стрелки *4* подвижная часть была уравновешенной в поле силы тяжести, имеются противовесы *9*. Установка стрелки на нулевое деление шкалы производится с помощью корректора *10*.

Угол поворота стрелки в приборах магнитоэлектрической системы пропорционален силе тока.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

96. Точечные электрические заряды q_1, q_2 и q_3 находятся в вершинах прямоугольника. Определите силу $\vec{F}_э$, с которой действует на заряд q_3 электрическое поле зарядов q_1 и q_2. Расстояние между зарядами q_3 и q_1 равно 1 см, между зарядами q_3 и q_2 — 3 см; $q_3 = +10^{-9}$ Кл, $q_1 = -10^{-9}$ Кл, $q_2 = -4 \cdot 10^{-9}$ Кл.

Решение

$|q_1| = 10^{-9}$ Кл
$|q_2| = 4 \cdot 10^{-9}$ Кл
$|q_3| = 10^{-9}$ Кл
$r_1 = 10^{-2}$ м
$r_2 = 3 \cdot 10^{-2}$ м
$k = 9 \cdot 10^9$ Н·м²/Кл²

$F_э$ — ?

Сила $\vec{F}_э$, с которой действует электрическое поле зарядов q_1 и q_2 на заряд q_3, находится как сумма сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, действующих со стороны зарядов q_1 и q_2 на заряд q_3 (рис. 206):

$$\vec{F}_э = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

Так как угол между векторами $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ равен 90°, то модуль вектора $\vec{F}_э$ можно найти, используя теорему Пифагора:

$$F_э = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}, \quad \text{где } F_1 = k\frac{|q_1|\,|q_3|}{r_1^2}, \quad F_2 = k\frac{|q_2|\,|q_3|}{r_2^2}.$$

$$F_1 = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-9} \cdot 10^{-9}}{10^{-4}} \text{ Н} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ Н};$$

$$F_2 = 9 \cdot 10^9 \frac{4 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-9}}{9 \cdot 10^{-4}} \text{ Н} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Н}.$$

$$F_э = \sqrt{81 \cdot 10^{-10} + 16 \cdot 10^{-10}} \approx 10^{-4} \text{ Н}.$$

97. Вычислите напряженность электрического поля в точке A, находящейся на прямой, проходящей через два точечных электрических заряда q_1 и q_2, расположенных в точках B и C. $q_1 = +10^{-10}$ Кл, $q_2 = +2 \cdot 10^{-10}$ Кл, $|AB| = 3$ см, $|BC| = 9$ см. Рассмотреть все возможные случаи расположения точки A по отношению к точкам B и C.

Решение

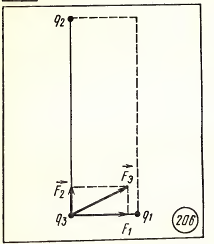
$|q_1| = 10^{-10}$ Кл
$|q_2| = 2 \cdot 10^{-10}$ Кл
$|AB| = 3 \cdot 10^{-2}$ м
$|BC| = 9 \cdot 10^{-2}$ м
$k = 9 \cdot 10^9$ Н·м²/Кл²

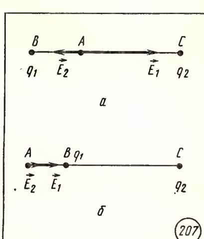
E_A — ?

Напряженность электрического поля $\vec{E}_A$ в точке A равна

$$\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2,$$

где $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ — напряженности полей, создаваемых в точке A зарядами q_1 и q_2. Модули напряженностей $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ соответственно равны





$$E_1=k\frac{|q_1|}{r_1^2},\quad E_2=\frac{|q_2|}{r_2^2},$$

где $r_1=|AB|$, $r_2=|AC|$.

По условию задачи возможны два случая. В первом случае точка A находится между точками B и C (рис. 207, *а*). Тогда $|AB|=r_1=3\times\times10^{-2}$ м; $|AC|=r_2=9\cdot10^{-2}$ м $-3\cdot10^{-2}$ м $=6\cdot10^{-2}$ м

$$E_1=9\cdot10^9\,\frac{10^{-10}}{9\cdot10^{-4}}\text{ В/м}=10^3\text{ В/м};$$

и

$$E_2=9\cdot10^9\,\frac{2\cdot10^{-10}}{36\cdot10^{-4}}\text{ В/м}=5\cdot10^2\text{ В/м}.$$

Векторы $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ направлены противоположно, по модулю вектор $\vec{E}_1$ больше вектора $\vec{E}_2$. Поэтому вектор $\vec{E}_A$ направлен от B к A и модуль его равен

$$E_A=E_1-E_2;\qquad E_A=10^3\text{ В/м}-5\cdot10^2\text{ В/м}=5\cdot10^2\text{ В/м}.$$

Во втором случае точки A и C находятся по разные стороны от точки B (рис. 205, *б*). В этом случае

$$r_1=|AB|=3\cdot10^{-2}\text{ м},$$

$$r_2=|AC|=|AB|+|BC|=9\cdot10^{-2}\text{ м}+10^{-2}\text{ м}=12\cdot10^{-2}\text{ м}.$$

$$E_1=10^3\text{ В/м},\ E_2=9\cdot10^3\,\frac{2\cdot10^{-10}}{144\cdot10^{-4}}\text{ В/м}=1{,}25\cdot10^2\text{ В/м}.$$

Векторы $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ направлены в одну сторону:

$$E_A=E_1+E_2;\quad E_A=10^3\text{ В/м}+1{,}25\cdot10^2\text{ В/м}=1125\text{ В/м}.$$

98. На каком расстоянии от маленького заряженного шара напряженность электрического поля в воде с диэлектрической проницаемостью 81 будет такой же, как в вакууме на расстоянии 18 см от центра шара?

Решение

$q_1 = q_2 = q$
$E_1 = E_2$
$\varepsilon_1 = 1$
$\varepsilon_2 = 81$
$r_1 = 0{,}18$ м

r_2 — ?

Так как напряженность поля одинакова: $E_1 = E_2$, то

$$\frac{k|q|}{\varepsilon_1 r_1^2} = \frac{k|q|}{\varepsilon_2 r_2^2}.$$

Отсюда расстояние r_2 равно

$$r_2 = r_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}, \quad r_2 = 0{,}18 \sqrt{\frac{1}{81}}\ \text{м} = 0{,}02\ \text{м}.$$

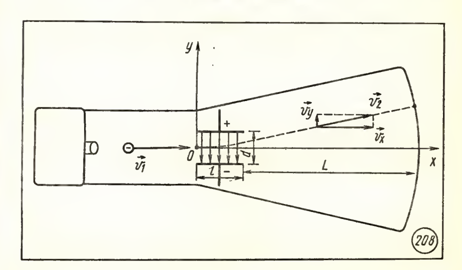
99. Ускоряющее напряжение в электронно-лучевой трубке равно 1,5 кВ, расстояние от отклоняющих пластин до экрана — 30 см. На какое расстояние сместится пятно на экране осциллографа при подаче на отклоняющие пластины напряжения 20 В? Расстояние между пластинами — 0,5 см, длина пластин — 2,5 см.

Решение

$U_а = 1{,}5 \cdot 10^3$ В
$L = 0{,}30$ м
$U_y = 20$ В
$d = 5 \cdot 10^{-3}$ м
$l = 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ м

y — ?

Выберем систему координат с осью OX, направленной вдоль оси трубки, по направлению вектора $\vec{v}_1$ скорости электронов до входа в пространство между отклоняющими пластинами. Ось OY выберем направленной противоположно вектору напряженности электрического поля между отклоняющими пластинами (рис. 208).



Пренебрегая малым смещением электронов между пластинами, отклонение y электронного луча можно найти, зная проекцию скорости электрона на ось OY после прохождения между отклоняющими пластинами и время t_2 движения электрона от отклоняющих пластин до экрана:

$$y = v_y t_2. \qquad (1)$$

Время t_2 равно

$$t_2 = \frac{L}{v_x}. \qquad (2)$$

Проекцию скорости электрона на ось OY можно найти по проекции ускорения a_y и времени t_1 движения электрона между пластинами:

$$v_y = a_y t_1, \qquad (3)$$

где

$$a_y = \frac{F_y}{m} = \frac{eE}{m} = \frac{eU_y}{md} \qquad (4)$$

(e — заряд электрона; m — его масса),

а

$$t_1 = \frac{l}{v_x} \qquad (5)$$

Так как кинетическая энергия электрона равна работе сил ускоряющего электрического поля, проекцию скорости электрона v_x можно найти из выражения

$$eU_a = \frac{mv_x^2}{2}:$$

$$v_x = \sqrt{\frac{2eU_a}{m}}. \qquad (6)$$

Используя выражения (1)—(6), получим

$$y = v_y t_2 = a_y t_1 t_2 = \frac{eU_y lL}{mdv_x v_x} = \frac{eU_y lLm}{md2eU_a} = \frac{U_y lL}{2dU_a}.$$

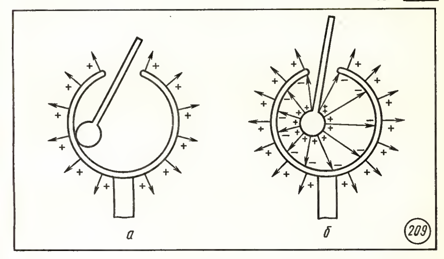
Подставляя данные из условия задачи, находим смещение луча:

$$y = \frac{20 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}30}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}5 \cdot 10^{3}}\ \text{м} = 10^{-2}\ \text{м}.$$

100. Внутрь незаряженной металлической сферы на изолирующей подставке вносится заряженный металлический шарик. Будет ли существовать электрическое поле внутри сферы и вне ее?

Решение

Возможны два случая. 1. Шарик касается внутренней поверхности сферы, при этом все свободные электрические заряды с него



переходят на сферу и взаимным отталкиванием вытесняются на ее внешнюю поверхность. Распределение свободных зарядов на поверхности проводящего тела устанавливается такое, при котором напряженность электрического поля внутри проводника равна нулю. Если напряженность поля равна нулю в проводнике и внутри сферы нет свободных зарядов, то напряженность поля внутри сферы равна нулю. Вне сферы электрическое поле создается свободными зарядами, находящимися на внешней поверхности сферы (рис. 209, *а*).

2. Заряженный шарик внесен внутрь металлической сферы и не касается ее внутренней поверхности (рис. 209, *б*), тогда электрическое поле заряженного шарика приводит в движение свободные заряды в металлической сфере. На внутренней поверхности сферы сосредоточиваются электрические заряды противоположного знака, на внешней поверхности — того же знака, что и на заряженном шарике. Электрическое поле существует как внутри сферы, так и вне ее. Между внутренней и внешней поверхностями сферы напряженность электрического поля равна нулю.

101. Как изменяются напряженность электрического поля, напряжение и энергия заряженного плоского воздушного конденсатора при увеличении расстояния между пластинами в два раза?

Решение

Возможны два случая. 1. Если конденсатор заряжен до напряжения U и отключен от источника тока, то при раздвижении пластин неизменной величиной является электрический заряд q на его

пластинах. При увеличении расстояния d между пластинами электроемкость конденсатора

$$C=\frac{\varepsilon_0 S}{d}$$

уменьшается в два раза. Поэтому напряжение $U=\frac{q}{C}$ увеличивается в два раза.

Напряженность E поля между пластинами $E=\frac{U}{d}$ при одинаковом увеличении напряжения U и расстояния d остается постоянной.

Энергия конденсатора равна

$$W=\frac{q^2}{2C}.$$

Так как заряд q постоянен, а электроемкость C уменьшается в два раза, то энергия увеличивается в два раза. Увеличение энергии в два раза происходит за счет работы внешних сил, совершаемой при раздвижении пластин конденсатора.

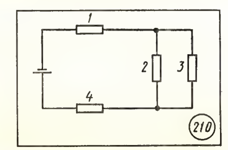
2. Если конденсатор подключен к источнику тока, напряжение между его пластинами при их раздвигании остается постоянным. Напряженность поля при постоянном напряжении U и увеличении в два раза расстояния d уменьшается в два раза.

Энергия конденсатора равна

$$W=\frac{CU^2}{2}.$$

При постоянном напряжении U и уменьшении в два раза электроемкости C энергия уменьшается в два раза. Уменьшение энергии заряженного конденсатора происходит потому, что с уменьшением электроемкости при раздвигании пластин электрический заряд на его пластинах убывает в два раза, т. е. конденсатор разряжается.

102. Определите общее электрическое сопротивление четырех проводников — *1, 2, 3, 4* — с электрическими сопротивлениями $R_1=R_2=R_3=R_4=4$ Ом, соединенных между собой по схеме, представленной на рисунке 210.



Решение

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 4$ Ом

R — ?

Проводники *2* и *3* соединены параллельно между собой и последовательно с проводниками *1* и *4*.

Для определения общего электрического сопротивления цепи необходимо найти общее сопротивление R_{23} параллельно включенных проводников *2* и *3* и затем сумму электрических сопротивлений последовательно включенных проводников:

$$R = R_1 + R_{23} + R_4; \qquad \frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3};$$

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{4}\ \text{Ом}^{-1} + \frac{1}{4}\ \text{Ом}^{-1} = \frac{1}{2}\ \text{Ом}^{-1};$$

$$R_{23} = 2\ \text{Ом}; \qquad R = 4\ \text{Ом} + 2\ \text{Ом} + 4\ \text{Ом} = 10\ \text{Ом}.$$

103. Параллельно амперметру включается шунт — резистор с электрическим сопротивлением $R_ш$, в n раз меньшим внутреннего сопротивления $R_а$ прибора. Во сколько раз при этом изменяются показания прибора (рис. 211)?

Решение

$R_ш = \frac{R_а}{n}$

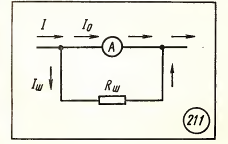
$\frac{I}{I_0}$ — ?

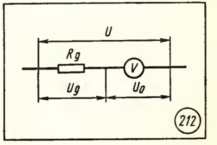
При решении задачи используем формулы параллельного соединения: напряжение на шунте и амперметре имеет одно и то же значение U, а сила тока I в неразветвленной цепи равна сумме сил токов I_0 через амперметр и $I_ш$ через шунт: $I = I_0 + I_ш$.

Отсюда следует, что

$$\frac{I}{I_0} = \frac{I_0 + I_ш}{I_0} = 1 + \frac{I_ш}{I_0} = 1 + \frac{\frac{U}{R_ш}}{\frac{U}{R_0}} = 1 + \frac{R_а}{R_ш} = 1 + n.$$

Сила тока I в неразветвленной цепи в $n+1$ раз больше силы тока I_0, регистрируемой амперметром.







104. Последовательно с вольтметром, внутреннее сопротивление которого $R_в$, включен дополнительный резистор с электрическим сопротивлением $R_д$, в n раз большим сопротивления вольтметра. Во сколько раз при этом расширились пределы измерения напряжения вольтметром?

Решение

Если вольтметр с внутренним сопротивлением $R_в$ предназначен для измерения напряжений до максимального значения U_0, то при включении последовательно с вольтметром дополнительного резистора с электрическим сопротивлением $R_д$ (рис. 212) измеряемое напряжение U будет равно сумме напряжений $U_д$ на дополнительном резисторе и U_0 на вольтметре:

$$U = U_д + U_0.$$

Отсюда следует $\dfrac{U}{U_0} = \dfrac{U_д + U_0}{U_0} = \dfrac{U_д}{U_0} + 1 = \dfrac{R_д}{R_в} + 1.$

По условию отношение $\dfrac{R_д}{R_в} = n$, поэтому $\dfrac{U}{U_0} = n + 1.$

Мы получили, что при включении последовательно с вольтметром дополнительного резистора, сопротивление которого в n раз превосходит сопротивление вольтметра, показания вольтметра уменьшатся в $n+1$ раз. В результате вольтметром с дополнительным резистором можно измерить напряжение в $n+1$ раз большее, чем тем же вольтметром без дополнительного резистора.

105. Определите напряжение на выходе источника постоянного тока с ЭДС 20 В, внутренним сопротивлением 2 Ом при подключении нагрузки с электрическим сопротивлением 8 Ом.

Решение

$\mathscr{E} = 20$ В
$r = 2$ Ом
$R = 8$ Ом

U — ?

$$U = IR; \quad I = \frac{\mathscr{E}}{R+r}; \qquad U = \frac{\mathscr{E}R}{R+r};$$

$$U = \frac{20\ \text{В} \cdot 8\ \text{Ом}}{8\ \text{Ом} + 2\ \text{Ом}} = 16\ \text{В}.$$

106. Сколько времени потребуется для нагревания воды массой 2 кг от начальной температуры 10° С до кипения в электрическом чайнике с электрическим нагревателем мощностью 1 кВт, если его КПД равен 90%? Какова сила тока в электрической спирали нагревательного элемента, если напряжение равно 220 В?

Решение

$m=1$ кг
$c=4{,}2\cdot10^3$ Дж/(кг·К)
$\Delta T=90$ К
$\eta=0{,}9$
$P=1000$ Вт
$U=220$ В

---

t — ? I — ?

Количество теплоты, необходимое для нагревания воды в чайнике, определяется по формуле

$$Q=cm\Delta T.$$

Оно связано с мощностью P нагревателя, его КПД и временем t выражением

$$Q=\eta Pt.$$

Отсюда $t=\dfrac{Q}{\eta P}=\dfrac{cm\Delta T}{\eta P}$; $t=\dfrac{4{,}2\cdot10^3\cdot1\cdot90}{0{,}9\cdot1000}$ с $=420$ с.

Для нахождения силы тока выразим электрическую мощность через силу тока I и напряжение U:

$$P=IU, \qquad I=\frac{P}{U}, \qquad I=\frac{1000}{220}\text{ А}\approx4{,}5\text{ А}.$$

107. С какой силой действует магнитное поле с индукцией 1,5 Тл на проводник длиной 30 см, расположенный перпендикулярно вектору индукции? Сила тока в проводнике равна 2 А.

Решение

$B=1{,}5$ Тл
$l=0{,}3$ м
$I=2$ А

F — ?

Так как проводник расположен перпендикулярно вектору индукции $\vec{B}$, то модуль силы Ампера определяется выражением

$$F=IBl;$$

$$F=2\text{ А}\cdot1{,}5\text{ Тл}\cdot0{,}3\text{ м}=0{,}9\text{ Н}.$$

108. При равномерном изменении силы тока от 1 до 6 А за 0,1 с в катушке возникает ЭДС самоиндукции 50 В. Какова индуктивность катушки?

Решение

$I_1=1$ А
$I_2=6$ А
$\Delta t=0{,}1$ с
$\mathcal{E}_{is}=50$ В

L — ?

Для решения задачи воспользуемся формулой, выражающей связь ЭДС самоиндукции с индуктивностью катушки L и скоростью изменения силы тока:

$$\mathcal{E}_{is}=L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Откуда $L=\dfrac{\mathcal{E}_{is}\Delta t}{\Delta I}$; $L=\dfrac{50\cdot0{,}1}{5}$ Гн $=1$ Гн.

109. Магнитный поток через контур из проводника с электрическим сопротивлением 2 Ом равномерно увеличился от 0 Вб до $3 \cdot 10^{-4}$ Вб. Какой заряд при этом прошел через поперечное сечение проводника?

Решение

При равномерном увеличении магнитного потока через контур ЭДС индукции и сила тока в цепи постоянны. В этом случае электрический заряд Δq равен $\Delta q = I\Delta t$. Следовательно, нужно найти силу тока в цепи.

По закону электромагнитной индукции модуль ЭДС в контуре при изменении магнитного потока определяется уравнением

$$\mathscr{E}_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t},$$

где Δt — время изменения магнитного потока.

По закону Ома для полной цепи сила тока I равна $I = \frac{\mathscr{E}_i}{R}$, где R — электрическое сопротивление проводника, являющееся в данном случае полным сопротивлением цепи. Подставляя в найденное выражение для $\mathscr{E}_i$, получаем

$$I = \frac{\mathscr{E}_i}{R} = \frac{\Delta\Phi}{R\Delta t} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{R\Delta t}.$$

Отсюда для Δq следует

$$\Delta q = I\Delta t = \frac{\Delta\Phi}{R} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{R}; \qquad \Delta q = \frac{3 \cdot 10^{-4}\ \text{Вт}}{2\ \text{Ом}} = 1{,}5 \cdot 10^{-4}\ \text{Кл}.$$

110. Конденсатор электроемкостью 10 мкФ, заряженный до напряжения 100 В, разряжается через катушку с очень малым электрическим сопротивлением и индуктивностью 10^{-3} Гн. Найдите максимальное значение силы тока в катушке.

Решение

При разрядке конденсатора происходит превращение энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки. При максимальном значении силы тока в катушке энергия магнитного поля имеет максимальное значение. Максимальное значение энергии магнитного поля катушки по закону сохранения и превращения энергии равно энергии электрического поля конденсатора при его подключении к катушке:

$$E_э = E_м; \qquad \frac{CU^2}{2} = \frac{LI_{max}^2}{2}.$$

Из последнего уравнения получаем выражение для вычисления силы тока в катушке:

$$I_{max}=\sqrt{\frac{C}{L}U^2}=U\sqrt{\frac{C}{L}};$$

$$I_{max}=100\ \text{В}\cdot\sqrt{\frac{10^{-5}\ \Phi}{10^{-3}\ \text{Гн}}}=10\ \text{А}.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

111. В трех вершинах квадрата со стороной 10 см находятся одинаковые точечные положительные заряды по $3\cdot10^{-8}$ Кл. С какой силой будут действовать эти заряды на положительный точечный электрический заряд $2\cdot10^{-8}$ Кл, расположенный в четвертой вершине квадрата?

112. Вычислите напряженность электрического поля на расстоянии $5\cdot10^{-11}$ м от протона.

113. На точечный электрический заряд $5\cdot10^{-10}$ Кл электрическое поле действует силой 10^{-7} Н. Определите напряженность электрического поля.

114. Напряженность поля на расстоянии 30 см от точечного электрического заряда равна 9 В/см. Чему равна напряженность поля на расстоянии 10 см от заряда?

115. Между двумя заряженными параллельными металлическими пластинами напряжение равно 100 В, расстояние между пластинами — 2 см. Определите напряженность электрического поля в пространстве между пластинами.

116. Вычислите работу сил электрического поля при перемещении электрического заряда 5 Кл между точками с напряжением 10 В.

117. Какую кинетическую энергию приобретает электрон в трубке кинескопа, если ускоряющее напряжение равно 15 кВ?

118. С какой скоростью движутся электроны в кинескопе телевизора при ускоряющем напряжении 30 кВ?

119. Какую площадь должны иметь пластины плоского конденсатора, для того чтобы его электроемкость была равна 1 мкФ, если между пластинами помещается слой слюды толщиной 0,1 мм? Относительная диэлектрическая проницаемость слюды $\varepsilon=7$.

120. При напряжении между пластинами конденсатора 200 В разноименные заряды на пластинах равны 10^{-4} Кл. Чему равна электроемкость конденсатора?

121. На обкладках плоского воздушного конденсатора находятся разноименные электрические заряды по 10^{-8} Кл. Чему равно напряжение между обкладками, если площадь пластин 100 см^2, а расстояние между пластинами равно 0,9 мм?

122. На пластинах воздушного конденсатора электроемкостью 500 пФ находятся разноименные электрические заряды по 10^{-9} Кл. Чему равно напряжение между пластинами? Каким станет напряжение между пластинами, если заряд останется прежним, а расстояние между ними увеличится в два раза?

123. Вычислите энергию электрического поля конденсатора электроемкостью 10 мкФ, заряженного до напряжения 10 В.

124. Определите напряжение на выходе источника постоянного тока с ЭДС 20 В и внутренним сопротивлением 2 Ом при подключении нагрузки с электрическим сопротивлением 8 Ом.

125. Для определения ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока к его выходу был подключен сначала резистор сопротивлением $R_1 = 2$ Ом, затем — резистор сопротивлением $R_2 = 4$ Ом. В первом случае сила тока в цепи была $I_1 = 0,5$ A, во втором — $I_2 = 0,3$ А. По этим значениям силы тока и электрического сопротивления внешней цепи найдите ЭДС источника и его внутреннее сопротивление.

126. Сколько времени нужно пропускать электрический ток через раствор серной кислоты для получения 1 г водорода при силе тока в цепи 0,1 А?

127. С какой силой действует однородное магнитное поле с индукцией 2,5 Тл на проводник длиной 50 см, расположенный под углом 30° к вектору индукции, при силе тока в проводнике 0,5 А?

128. Какой должна быть сила тока в обмотке якоря электромотора для того, чтобы на участок обмотки из 20 витков длиной 10 см, расположенный перпендикулярно вектору индукции в магнитном поле с индукцией 1,5 Тл, действовала сила 120 Н?

129. На прямолинейный участок проводника с током длиной 2 см между полюсами постоянного магнита действует сила 10^{-3} Н при силе тока в проводнике 5 А. Определите магнитную индукцию, если вектор индукции перпендикулярен проводнику.

130. Чему равен магнитный поток однородного магнитного поля, создаваемый электромагнитом, если индукция магнитного поля 0,5 Тл, а площадь поперечного сечения электромагнита 100 см^2?

131. Вычислите радиус окружности, по которой будет двигаться электрон в однородном магнитном поле с индукцией 10^{-4} Тл, если вектор скорости электрона направлен перпендикулярно вектору индукции, а модуль скорости равен 10^6 м/с.

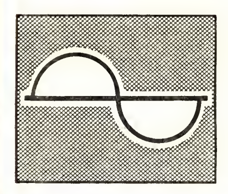
132. С каким периодом будет обращаться протон в однородном магнитном поле с индукцией 1 Тл при значениях скорости, значительно меньших скорости света?

133. Магнитный поток через замкнутый проводник сопротивлением 0,5 Ом равномерно увеличился с $2 \cdot 10^{-4}$ Вб до $10 \cdot 10^{-4}$ Вб. Какой заряд прошел через поперечное сечение проводника?

134. Конденсатор емкостью 5 мкФ, заряженный до напряжения 120 В, разряжается на катушку. Максимальная сила разрядного тока равна 0,4 А. Определите индуктивность катушки.

135. По двум направляющим параллельным проводникам, расстояние между которыми 15 см, движется с постоянной скоростью 0,6 м/с перемычка перпендикулярно магнитному полю с индукцией 1 Тл. В замкнутую цепь включен резистор сопротивлением 2 Ом. Определите силу индукционного тока в цепи и количество теплоты, выделенной в резисторе в течение 2 с.

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



59. Механические колебания 214
60. Гармонические колебания 216
61. Превращения энергии при механических колебаниях 218
62. Распространение колебаний в упругой среде . . 221
63. Звуковые волны . . . 223
64. Отражение и преломление волн 224
65. Интерференция, дифракция и поляризация волн . 227
66. Свободные электромагнитные колебания. . . . 231
67. Автоколебательный генератор незатухающих электромагнитных колебаний 235
68. Переменный электрический ток 237
69. Активное сопротивление в цепи переменного тока . 240
70. Индуктивность и емкость в цепи переменного тока 242
71. Резонанс в электрической цепи 244
72. Трансформатор 245
73. Электромагнитные волны 247
74. Принципы радиосвязи . 251
75. Энергия электромагнитных волн 261
76. Развитие представлений о природе света 262
77. Отражение и преломление света 264
78. Волновые свойства света 266
79. Оптические приборы . . 269
80. Спектр электромагнитных излучений 278
81. Элементы теории относительности 280

Примеры решения задач . 289
Задачи для самостоятельного решения 295

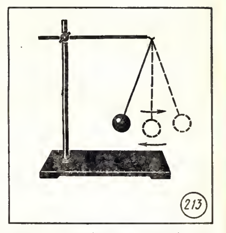
59. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

В природе и технике, кроме поступательного и вращательного движений, часто встречается еще один вид механического движения — *колебания.*

Совершают колебания ветви дерева на ветру и маятник в часах, поршень в цилиндре двигателя внутреннего сгорания и земная кора во время землетрясений, струна гитары и поверхностный слой воды на море. Общий признак колебательного движения во всех этих примерах — точное или приблизительное повторение движения через одинаковые промежутки времени. *Механическими колебаниями* называют движения тел, повторяющиеся точно или приблизительно через одинаковые промежутки времени.

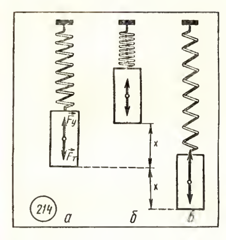
Свободные и вынужденные колебания. Силы, действующие между телами внутри рассматриваемой системы тел, называют *внутренними силами.* Силы, действующие на тела системы со стороны других тел, не входящих в эту систему, называют *внешними силами.*

Свободными колебаниями называют колебания, возникающие под действием внутренних сил. По этому признаку колебания груза, подвешенного на пружине, или шарика на нити (рис. 213) являются свободными колебаниями. Колебания под действием внешних периодически изменяющихся сил называются *вынужденными колебаниями.* Вынужденные колебания совершают поршень в цилиндре автомобильного двигателя и нож электробритвы, игла швейной машины и резец строгального станка.



Условия возникновения свободных колебаний. Рассмотрим условия возникновения свободных механических колебаний. Закрепим в лапке штатива один конец стальной пружины, а к другому концу подвесим груз. Груз может находиться в покое при условии равенства по модулю действующих на него противоположно направленных сил: силы





тяжести $\vec{F}_т$ и силы упругости $\vec{F}_у$, (рис. 214, *а*):

$$\vec{F}_у + \vec{F}_т = \vec{0}.$$

Положение, в котором сумма векторов сил, действующих на тело, равна нулю, называется положением равновесия. При смещении груза вверх от положения равновесия из-за уменьшения деформации пружины сила упругости убывает, сила тяжести остается постоянной (рис. 214, *б*). Равнодействующая $\vec{F}$ этих сил направлена вниз, к положению равновесия. При смещении груза вниз из положения равновесия из-за увеличения деформации пружины сила упругости возрастает, а сила тяжести остается неизменной (рис. 214, *в*). Равнодействующая $\vec{F}$ этих сил в этом случае направлена вверх, к положению равновесия.

Если груз поднять выше положения равновесия и затем отпустить, то под действием равнодействующей силы, направленной вниз, груз движется ускоренно до положения равновесия. После прохождения положения равновесия равнодействующая сила уже направлена вверх и поэтому тормозит движение груза, вектор ускорения $\vec{a}$ изменяет направление на противоположное. После остановки в нижнем положении груз движется ускоренно вверх, к положению равновесия, затем проходит его, испытывает торможение, останавливается, начинает двигаться ускоренно вниз и т. д.— процесс периодически повторяется.

Аналогичные процессы происходят при колебаниях груза, подвешенного на нити.

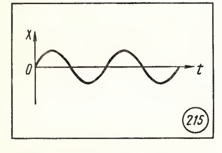
Рассмотрев различные примеры свободных механических колебаний, можно выделить условия их возникновения:

1) Силы, действующие на тело, или хотя бы одна из них, должны зависеть от координат. В одном определенном положении тела в пространстве, называемом положением равновесия, равнодействующая всех сил, действующих на тело, должна быть равна нулю. При выведении тела из положения равновесия равнодействующая всех сил должна быть отлична от нуля и направлена к положению равновесия.

2) Силы трения в системе должны быть достаточно малы.

Аналитическое и графическое представление колебаний. Для описания колебаний как процесса, происходящего во времени, используются способы аналитического и графического их представления.

Для аналитического описания колебаний тела относительно положения равновесия задается



функция $f(t)$, выражающая зависимость смещения x от времени t:

$$x = f(t).$$

График этой функции дает наглядное представление о протекании процесса колебаний во времени. Получить такой график можно построением по точкам графика функции $f(t)$ в координатных осях OX, t (рис. 215).

Период и частота колебаний. Общим признаком механических колебаний как физического процесса является повторяемость процесса движения через определенный промежуток времени. Минимальный интервал времени, через который происходит повторение движения тела, называется *периодом колебаний*. Период колебаний (обозначается буквой T) выражается в секундах.

Физическая величина, обратная периоду колебаний, называется *частотой колебаний:*

$$\nu = \frac{1}{T}. \qquad (59.1)$$

Частота определяет число колебаний, происходящих за 1 с. Единица частоты — *герц* (Гц). 1 Гц $= 1$ с$^{-1}$. В физике и технике широко используется понятие *циклической частоты*. Циклическая частота определяет число колебаний, происходящих за 2π с. Связь между циклической частотой ω и частотой ν задается выражением

$$\omega = 2\pi\nu. \qquad (59.2)$$

Циклическая частота ω и период колебаний T связаны соотношением

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \qquad (59.3)$$

60. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Гармонические колебания. *Гармоническими колебаниями* называют колебания, описываемые уравнением

$$x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0). \qquad (60.1)$$

Здесь x — смещение тела от положения равновесия, ω — циклическая частота колебаний, t — время.

Амплитуда и фаза колебаний. Модуль максимального смещения x_m тела от положения равновесия называется *амплитудой* колебаний. Величина, стоящая под знаком косинуса, называется *фазой* φ гармонического колебания:

$$\varphi = \omega t + \varphi_0. \qquad (60.2)$$

Фаза колебаний φ_0 в начальный момент времени $t = 0$ называется *начальной фазой*.

Скорость и ускорение при гармонических колебаниях. Най-

дем, как зависят от времени скорость и ускорение тела, совершающего гармонические колебания по закону

$$x = x_m \cos\omega t \qquad (60.3)$$

вдоль координатной оси OX. Скорость v_x движения тела определяется выражением

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Более строго проекция скорости поступательного движения тела на ось OX определяется как производная координаты x по времени:

$$v_x = x'(t) = -x_m \omega \sin\omega t =$$

$$= x_m \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (60.4)$$

Для определения проекции ускорения движения тела в любой момент времени необходимо найти производную от проекции скорости v_x по времени t:

$$a_x = v_x'(t) = -x_m \omega^2 \cos\omega t =$$

$$= x_m \omega^2 \cos(\omega t + \pi). \quad (60.5)$$

Гармонические колебания под действием силы упругости. Из уравнений (60.3) и (60.5) следует, что

$$a_x = -\omega^2 x. \qquad (60.6)$$

При гармонических колебаниях тела вдоль оси OX ускорение прямо пропорционально смещению x тела от положения равновесия.

Примером силы, пропорциональной смещению тела, является сила упругости. По закону Гука сила упругости прямо пропорциональна деформации x тела:

$$(F_у)_x = -kx.$$

Действие силы упругости может вызывать возникновение гармонических колебаний. Примером гармонических колебаний, возникающих под действием силы упругости, могут служить колебания груза, подвешенного на стальной пружине, колебания струны.

Если тело массой m совершает под действием силы упругости гармонические колебания с циклической частотой ω, то, применив второй закон Ньютона для проекции ускорения a_x, получим

$$a_x = \frac{(F_у)_x}{m}, \quad a_x = -\frac{k}{m}\, x. \quad (60.7)$$

С другой стороны, ускорение при гармонических колебаниях с циклической частотой ω определяется в любой момент времени выражением (60.6). Из выражений (60.6) и (60.7) устанавливается связь между циклической частотой ω, жесткостью k деформируемого тела и массой m тела:

$$\omega^2 = \frac{k}{m}, \qquad (60.8)$$

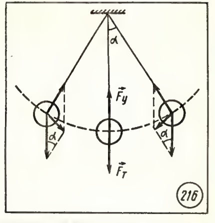
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \qquad (60.9)$$

Математический маятник. Тело небольших размеров, подвешенное на нерастяжимой нити, масса которой пренебрежимо мала по сравнению с массой тела, называют *математическим маятником.* При вертикальном положении нити действие силы тяжести $\vec{F}_т$ уравновешивается действием силы упругости $\vec{F}_у$. Это положение является положением равновесия.

При малых отклонениях маятника от положения равновесия возникает равнодействующая сил тяжести и упругости, направленная к положению равновесия (рис. 216), и его колебания являются гармоническими. Период колебаний равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad (60.10)$$

Зависимость периода колебаний маятника от ускорения свободного падения используется для точных измерений ускорения свободного падения на поверхности Земли. По результатам измерений можно обнаружить районы залегания полезных ископаемых — железной руды, нефти, газа.



61. ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

Превращения энергии при механических колебаниях. При отклонении математического маятника от положения равновесия его потенциальная энергия в поле тяготения увеличивается, так как увеличивается расстояние от поверхности Земли. При движении к положению равновесия скорость маятника возрастает, его кинетическая энергия увеличивается. Увеличение кинетической энергии происходит за счет уменьшения запаса потенциальной энергии маятника в результате уменьшения расстояния от поверхности Земли.

В положении равновесия кинетическая энергия имеет максимальное значение, а потенциальная энергия минимальна. После прохождения положения равновесия происходит превращение кинетической энергии в потенциальную, скорость маятника уменьшается и при максимальном отклонении становится равной нулю. При колебательном движении маятника всегда происходят периодические взаимные превращения его кинетической и потенциальной энергии.

Реальные механические колебания не происходят без потерь энергии. При любом механическом движении тел в результате их взаимодействия с окружающими телами часть механической энергии превращается во внутреннюю энергию теплового движения атомов и молекул. Амплитуда колебаний постепенно уменьшается,



и через некоторое время после начала колебаний маятник останавливается.

Свободные механические колебания всегда оказываются *затухающими* колебаниями, т. е. колебаниями с убывающей амплитудой.

Явление резонанса. В системе при возбуждении колебаний под действием периодически изменяющейся внешней силы амплитуда колебаний сначала постепенно увеличивается. Через некоторое время после начала действия переменной силы устанавливаются вынужденные колебания с постоянной амплитудой и с периодом, равным периоду внешней силы (рис. 217).

Амплитуда установившихся вынужденных колебаний определяется амплитудой действующей силы и потерями энергии в колебательной системе. Потери энергии в колебательной системе при установившихся вынужденных колебаниях за период равны работе внешних сил за это же время.

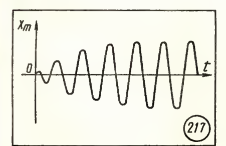
Амплитуда установившихся вынужденных колебаний зависит от частоты изменения силы. Максимального значения амплитуда вынужденных колебаний достигает при частоте ω колебаний внешней силы, примерно равной собственной частоте ω_0 колебаний системы:

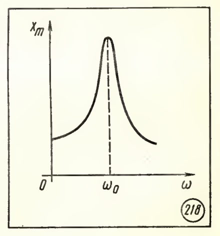
$$\omega \approx \omega_0.$$

Явление возрастания амплитуды установившихся вынужденных колебаний до максимального значения при приближении частоты изменения внешней силы к частоте свободных колебаний системы называется *резонансом*.

Пример зависимости амплитуды x_m вынужденных колебаний от частоты ω вынуждающей силы постоянной амплитуды представлен на рисунке 218. По оси абсцисс отсчитывается частота ω изменения силы, действующей на систему, по оси ординат — амплитуда x_m вынужденных колебаний.

При совпадении частоты ω изменения силы с собственной частотой ω_0 колебаний системы сила в течение всего периода оказы-





вается направленной в ту же сторону, что и вектор скорости колеблющегося тела. Поэтому в течение всего периода внешняя сила совершает положительную работу, увеличивая амплитуду колебаний тела. При любой другой частоте в течение одной части периода сила совершает положительную работу, увеличивая запас энергии в системе, в течение другой части периода та же сила совершает отрицательную работу, уменьшая запас энергии в колебательной системе.

Так как при резонансе внешняя сила совершает за период максимальную положительную работу над колебательной системой, то условие резонанса можно определить как условие максимальной передачи энергии колебательной системе.

При отсутствии трения амплитуда вынужденных колебаний при резонансе должна возрастать со временем неограниченно. В реальных системах амплитуда колебаний в установившемся режиме резонанса определяется условием равенства потерь энергии в течение периода и работы внешней силы за то же время. Чем меньше трение, тем больше амплитуда при резонансе.

Явление резонанса может быть причиной разрушения машин, зданий, мостов и других сооружений, если собственные частоты их колебаний совпадут с частотой периодически действующей силы. Поэтому, например, двигатели в автомобилях устанавливаются на специальных амортизаторах, а воинским подразделениям при движении по мосту запрещается идти в «ногу».

Конструкторы самолетов, ракет, мостов, зданий и других строений должны знать, какова собственная частота колебаний конструируемых ими машин и сооружений, чтобы исключить возможность воздействия на них периодических внешних сил с частотой, близкой к частоте собственных колебаний.

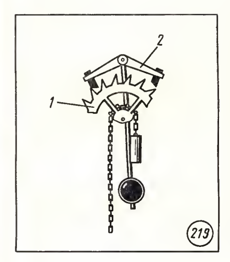
Автоколебательная система. *Автоколебаниями* называются незатухающие колебания в системе, поддерживаемые внутренними источниками энергии при отсутствии воздействия внешней переменной силы.

В отличие от вынужденных колебаний, частота и амплитуда автоколебаний определяются свойствами самой колебательной системы.

От свободных колебаний автоколебания отличаются независимостью амплитуды от времени и от начального кратковременного воздействия, возбуждающего процесс колебаний.

Автоколебательную систему обычно можно разделить на три основных элемента: 1) колебательную систему; 2) источник энергии; 3) устройство с обратной связью, регулирующее поступление энергии из источника в колебательную систему. Энергия, поступающая из источника за период, равна энергии, потерянной в колебательной системе за то же время.

Примером механической автоколебательной системы могут служить часы с маятником. В них колебательной системой является маятник, источником энергии — гиря, поднятая над землей, или стальная пружина (рис. 219). Ос-



новными деталями устройства, осуществляющего обратную связь, служит храповое колесо *1* и анкер *2*. Гиря (или пружина) вызывает вращение храпового колеса. При каждом колебании маятника зубец храпового колеса толкает анкерную вилку в таком направлеиии, что разгоняет маятник. В результате запас эиергии, израсходоваиной на трение, восполняется за счет энергии гири, поднятой над землей, или закрученной пружины. Вращение стрелок часов осуществляется с помощью зубчатых колес от храпового колеса.

62. РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В УПРУГОЙ СРЕДЕ

Поперечные волны. Твердые, жидкие, газообразные тела больших размеров можно рассматривать как среду, состоящую из отдельных частиц, взаимодействующих между собой силами связи. Возбуждение колебаний частиц среды в одном месте вызывает выиуждеиные колебания соседиих частиц, те в свою очередь возбуждают колебания следующих и т. д.

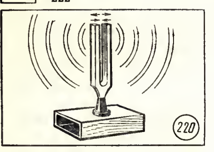
Процесс распространеиия колебаний в пространстве иазывается *волной*.

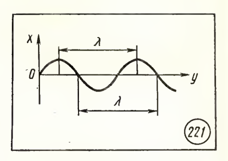
Возьмем длиный резиновый шнур и заставим одии конец шнура совершать выиуждеиные колебания в вертикальной плоскости. Силы упругости, действующие между отдельными частями шнура, приведут к распространению колебаний вдоль шнура, и мы увидим волну, бегущую вдоль шнура.

Другой пример механических волн — волны на поверхности воды.

При распространении волн в шнуре или иа поверхности воды колебаиия происходят перпендикулярно иаправлению распространения волн. Волны, в которых колебания происходят перпендикулярио иаправлеиию распространения, называются поперечиыми волнами.

Продольные волны. Не всякие волны можио увидеть. После удара молотком по ветви камертона мы слышим звук, хотя никаких волн в воздухе не видим. Ощущение звука в наших органах слуха возникает при периодическом измеиении давления воздуха. Колебания ветви камертона сопровождаются периодическими сжатиями и разрежениями воздуха вблизи иее. Эти процессы сжатия и разрежения распространя-





ются в воздухе во все стороны (рис. 220). Они и являются *звуковыми волнами*.

При распространении звуковой волны частицы среды совершают колебания вдоль направления распространения колебаний. Волны, в которых колебания происходят вдоль направления распространения волны, называют *продольными волнами*.

Продольные волны могут возникать в газах, жидкостях и твердых телах; поперечные волны распространяются в твердых телах, в которых возникают силы упругости при деформации сдвига или под действием сил поверхностного натяжения и силы тяжести.

Как в поперечных, так и в продольных волнах процесс распространения колебаний не сопровождается переносом вещества в направлении распространения волны. В каждой точке пространства частицы лишь совершают колебания относительно положения равновесия. Но распространение колебаний сопровождается передачей энергии колебаний от одной точки среды к другой.

Длина волны. Скорость распространения волны. Скорость распространения колебаний v в пространстве называется *скоростью волны*. Расстояние между ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах (рис. 221), называется *длиной волны*. Связь между длиной волны λ, скоростью волны v и периодом колебаний T дается выражением

$$\lambda = vT. \qquad (62.1)$$

Так как $T=\frac{1}{\nu}$, то скорость волны связана с частотой колебаний уравнением

$$v = \lambda\nu. \qquad (62.2)$$

Зависимость скорости распространения волн от свойств среды. При возникновении волн их частота определяется частотой колебаний источника волн, а скорость зависит от свойств среды. Поэтому волны одной и той же частоты имеют различную длину в разных средах.

63. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Скорость звука. Раздел физики, занимающийся изучением звуковых явлений, называется *акустикой*, а явления, связанные с возникновением и распространением звуковых волн, называются *акустическими явлениями*.

Важным событием в развитии акустики было экспериментальное определение скорости распространения звука. Первые опыты по измерению скорости звука в воздухе были поставлены еще в XVII в. В этих опытах измерялось время t между моментом наблюдения световой вспышки и моментом прихода звука при выстреле из пушки. Скорость распространения света в этих опытах принималась бесконечно большой, поэтому скорость звука определялась по известному расстоянию s до пушки и времени t распространения звука:

$$v=\frac{s}{t}.$$

По современным измерениям скорость звука в воздухе при нормальных условиях равна 331 м/с.

Процесс распространения сжатия или разрежения в газе происходит в результате столкновений молекул газа, поэтому скорость распространения звука в газе примерно равна скорости теплового движения молекул. Средняя скорость теплового движения молекул уменьшается с понижением температуры газа, поэтому уменьшается с понижением температуры газа и скорость распространения звука. Например, в водороде при понижении температуры от 300 до 17 К скорость звука уменьшается от 1300 до 320 м/с.

Связь между атомами и молекулами в жидкостях и твердых телах значительно более жесткая, чем в газах. Поэтому скорость распространения звуковых волн в жидкостях и твердых телах значительно больше скорости звука в газах. Например, скорость звука в воде равна 1500 м/с, а в стали 6000 м/с.

Громкость звука. Любые звуки человек характеризует в соответствии со своим восприятием по уровню громкости.

Сила воздействия звуковой волны на барабанную перепонку человеческого уха зависит от звукового давления.

Звуковое давление — это дополнительное давление, возникающее в газе или жидкости при прохождении звуковой волны. Нижняя граница ощущения звука человеческим ухом соответствует звуковому давлению примерно 10^{-5} Па, т. е. 10^{-10} от нормального атмосферного давления. Верхняя граница звукового давления, при достижении которой возникает ощущение боли в ушах, равна примерно 100 Па. Звуковые волны с большой амплитудой изменения звукового давления воспринимаются человеческим ухом как громкие звуки, с малой амплитудой изменения звукового давления — как тихие звуки.

Высота звука. Звуковые колебания, происходящие по гармоническому закону, воспринимаются человеком как определенный *музыкальный тон*. Колебания высо-

кой частоты воспринимаются как звуки *высокого тона*, звуки низкой частоты — как звуки *низкого тона*. Диапазон звуковых колебаний, соответствующий изменению частоты колебаний в два раза, называется октавой. Так, например, тон «ля» первой октавы соответствует частоте 440 Гц, тон «ля» второй октавы — частоте 880 Гц.

Звуковые колебания, не подчиняющиеся гармоническому закону, воспринимаются человеком как сложный звук, обладающий *тембром*. При одной высоте тона звуки, издаваемые, например, скрипкой и пианино, отличаются тембром.

Диапазон частот звуковых колебаний, воспринимаемых человеческим ухом, лежит в пределах примерно от 20 до 20 000 Гц. Продольные волны в среде с частотой изменения давления менее 20 Гц называются *инфразвуком*, с частотой более 20 000 Гц — *ультразвуком*.

Акустический резонанс. Звуковые волны, встречаясь с любым телом, вызывают вынужденные колебания. Если частота собственных свободных колебаний тела совпадает с частотой звуковой волны, то условия для передачи энергии от звуковой волны телу оказываются наилучшими — тело является акустическим резонатором. Амплитуда вынужденных колебаний при этом достигает максимального значения — наблюдается *акустический резонанс*.

Акустическими резонаторами являются трубы духовых инструментов, органа. В этом случае телом, испытывающим резонансное колебание, является воздух в трубе.

64. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ВОЛН

В однородной среде волны распространяются одинаково во все стороны от источника колебаний. Однако на границе раздела сред с различными физическими свойствами картина распространения волн существенно изменяется. Волна может частично перейти из одной среды в другую, а частично отразиться от границы раздела и распространяться в первой среде.

Звуковые волны, свободно распространяющиеся в воздухе при встрече со стеной испытывают отражение, и мы слышим эхо. Отражение поверхностных волн на воде можно наблюдать в опытах с волновой ванной.

Волновая поверхность и луч. Поверхность, на которой все точки колеблются в одинаковой фазе, называется *волновой поверхностью* или *волновым фронтом*. Линия, перпендикулярная волновой поверхности, называется *лучом*. Распространение волн происходит по направлению луча.

Принцип Гюйгенса. Отражение волн и другие закономерности их распространения можно объяснить на основании принципа, сформулированного в 1690 г. голландским физиком Христианом Гюйгенсом (1629—1695). Согласно принципу Гюйгенса каждая точка поверх-

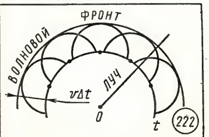


ности, которой достигла в данный момент волна, является точечным источником вторичных волн. Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени.

Зная форму волновой поверхности в некоторый момент времени t, можно найти форму волновой поверхности через интервал времени Δt. Если среда однородна, то от каждой точки волновой поверхности распространяется вторичная сферическая волна с одинаковой скоростью v, и расстояние Δl, на которое эти волны распространяются, будет одинаковым.

Волновой фронт в момент времени $t+\Delta t$ образуют точки, удаленные от первоначального фронта волны на расстояние $\Delta l = v\Delta t$ в направлении прямой, перпендикулярной фронту волны (рис. 222).

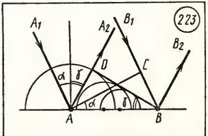
Если волны от точечного источника колебаний распространяются на поверхности воды, то волновые поверхности имеют форму окружностей. При распространении волн от точечного источника звука в воздухе волновые поверхности имеют сферическую форму, луч здесь является радиусом сферы.



Закон отражения волн. Рассмотрим процесс возникновения отраженной волны при падении волны с плоским фронтом на плоскую поверхность раздела двух сред.

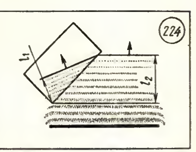
Угол между перпендикуляром к границе раздела двух сред и лучом называется *углом падения волны.* Если угол падения волны отличен от нуля, то падающая волна достигает различных точек границы раздела двух сред в разные моменты времени. Когда участок падающей волны, отмеченный лучом A_1A (рис. 223), достигнет границы раздела двух сред, точка A согласно принципу Гюйгенса становится источником вторичных волн. За то время, пока границы раздела достигнет участок волнового фронта, отмеченный лучом B_1B, вторичные волны от точки A распространятся на расстояние $R = v\Delta t$. Положение фронта отраженной волны в тот момент времени, когда луч B_1B достигнет границы раздела в точке B, отмечено на рисунке прямой BD.

Падающая и отраженная волны распространяются в одной и той же среде, скорость их одинакова. Поэтому за одно и то же время они проходят одинаковые расстояния, длина отрезка BC



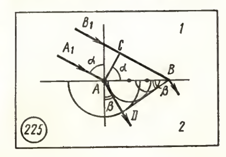
равна длине отрезка AD. Из равенства катетов AD и BC двух прямоугольных треугольников ACB и ADB с общей гипотенузой AB следует равенство этих треугольников. Поэтому равны между собой углы CAB и DBA. Этим углам равны соответственно угол падения α и угол отражения γ как углы со взаимно перпендикулярными сторонами. Следовательно, углы α и γ равны между собой. Этот вывод, полученный теоретически на основании использования принципа Гюйгенса, полностью подтверждается на опыте и называется *законом отражения волн:* **падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр, восставленный в точке падения, лежат в одной плоскости; угол отражения γ равен углу падения α.**

Преломление волн. Для наблюдения процесса распространения волн через границу раздела двух сред с различными физическими свойствами поставим следующий опыт. На дно волновой ванны положим стеклянную пластинку таким образом, чтобы один ее край был расположен под углом около 45° к направлению распространения плоских поверхностных волн на воде. Наблюдения показывают, что расстояние l_1, проходимое волной над стеклянной пластинкой, меньше расстояния l_2, которое проходит за то же время волна в той части ванны, где нет пластины (рис. 224). Следовательно, скорость распространения поверхностных волн зависит от глубины (толщины слоя воды), с уменьшением глубины скорость распространения волны уменьшается.



Край стеклянной пластины является границей раздела двух сред с различными физическими свойствами. Изменение направления распространения волн на границе раздела двух сред называется *преломлением волн.*

Закон преломления волн. Рассмотрим процесс возникновения преломленной волны при падении волны с плоским фронтом на плоскую поверхность раздела двух сред. Если угол падения волны отличен от нуля, то падающая волна достигает различных точек границы раздела двух сред в разные моменты времени. В тот момент времени, когда участок падающей волны, отмеченный лучом A_1A (рис. 225), достигает границы раздела двух сред, точка A согласно принципу Гюйгенса становится источником вторичных волн. За то время, пока в первой среде границы раздела достигнет участок волнового





фронта, отмеченный лучом B_1C, волны во второй среде от точки A распространятся на расстояние $AD = v_2 \Delta t$. Положение фронта преломленной волны в тот момент времени, когда луч B_1C достигает границы раздела в точке B, отмечено на рисунке прямой BD. Падающая и преломленная волны распространяются в разных средах, скорости их различны. Поэтому за одно и то же время они проходят различные расстояния. Угол падения α равен углу CAB, угол преломления β равен углу DBA как углы с взаимно перпендикулярными сторонами. Найдем отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\frac{|BC|}{|AB|}}{\frac{|AD|}{|AB|}} = \frac{|BC|}{|AD|}.$$

Так как $|BC| = v_1 \Delta t$ и $|AD| = v_2 \Delta t$, то

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}. \qquad (64.1)$$

Это выражение называется *законом преломления волн:* **падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восставленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред.**

Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления называется *относительным показателем преломления:*

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{12}. \qquad (64.2)$$

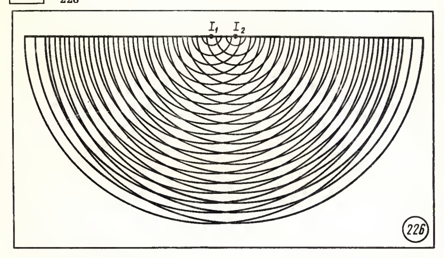
65. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ, ДИФРАКЦИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ ВОЛН

Принцип суперпозиции. Наблюдения за распространением волн на поверхности воды от двух или большего числа источников показывают, что волны проходят одна через другую, совершенно не влияя друг на друга. Точно так же не влияют друг на друга и звуковые волны. Когда играет оркестр, то звуки от каждого инструмента приходят к нам точно такими же, как если бы играл отдельно каждый инструмент.

Этот экспериментально установленный факт объясняется тем, что в пределах упругой деформации сжатие или растяжение тел вдоль одного направления не влияет на их упругие свойства при деформации по любым другим направлениям. Поэтому в каждой точке, которой достигают волны от разных источников, результат действия нескольких волн в любой момент времени равен сумме результатов действия каждой волны в отдельности. Эта закономерность называется *принципом суперпозиции.*

Интерференция волн. Для более глубокого понимания содержания принципа суперпозиции проделаем следующий опыт.

В волновой ванне с помощью вибратора с двумя стержнями создадим два точечных источника волн с одинаковой частотой ко-



226

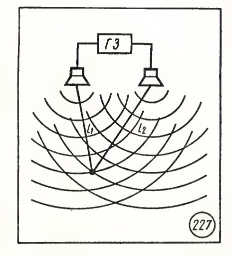
лебаний. Наблюдения показывают, что в этом случае в волновой ванне возникает особая картина распространения волн. На водной поверхности выделяются полосы, где колебания отсутствуют (рис. 226).

Подобное явление можно обнаружить в опытах со звуковыми волнами. Установим два динамических громкоговорителя и подключим их к выходу одного звукового генератора. Перемещаясь на небольшие расстояния в классной комнате, на слух можно обнаружить, что в одних точках пространства звучание громкое, а в других — тихое. Звуковые волны от двух источников в одних точках пространства усиливают, а в других ослабляют друг друга (рис. 227).

Явление увеличения или уменьшения амплитуды результирующей волны при сложении двух или нескольких волн с одинаковыми периодами колебаний называется *интерференцией волн*.

Явление интерференции волн не противоречит принципу суперпозиции. В точках с нулевой амплитудой колебаний две встречающиеся волны не «гасят» друг друга, обе они без изменений распространяются далее.

Условия интерференционного минимума и максимума. Амплитуда колебаний равна нулю в



227

тех точках пространства, в которые волны с одинаковыми амплитудой и частотой приходят со сдвигом по фазе колебаний на π или на половину периода колебаний. При одинаковом законе колебаний двух источников волн различие на половину периода колебаний будет при условии, что разность Δl расстояний l_1 и l_2 от источников волн до этой точки равна половине длины волны:

$$\Delta l = l_1 - l_2 = \lambda/2$$

или нечетному числу полуволн:

$$\Delta l = (2k+1)\,\lambda/2.$$

Разность Δl называется *разностью хода* интерферирующих волн, а условие

$$\Delta l = (2k+1)\,\lambda/2 \qquad (65.1)$$

называется условием интерференционного минимума.

Интерференционные максимумы наблюдаются в точках пространства, в которые волны приходят с одинаковой фазой колебаний. При одинаковом законе колебаний двух источников для выполнения этого условия разность хода Δl должна равняться целому числу волн:

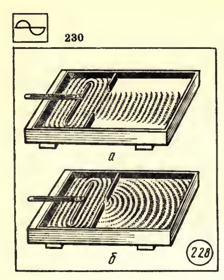
$$\Delta l = k\lambda. \qquad (65.2)$$

Когерентность. Интерференция волн возможна только при выполнении условия *когерентности*. Слово «когерентность» означает согласованность. Когерентными называются колебания с одинаковой частотой и постоянной во времени разностью фаз.

Интерференция и закон сохранения энергии. Куда исчезает энергия двух волн в местах интерференционных минимумов? Если рассматривать только одно место встречи двух волн, то на такой вопрос нельзя дать правильный ответ. Распространение волн не является совокупностью независимых процессов колебаний в отдельных точках пространства. Сущность волнового процесса заключается в передаче энергии колебаний от одной точки пространства к другой и т. д. При интерференции волн в местах интерференционных минимумов энергия результирующих колебаний действительно меньше суммы энергий двух интерферирующих волн. Зато в местах интерференционных максимумов энергия результирующих колебаний превышает сумму энергий интерферирующих волн ровно на столько, на сколько уменьшилась энергия в местах интерференционных минимумов. При интерференции волн энергия колебаний перераспределяется в пространстве, но при этом закон сохранения энергии строго выполняется.

Дифракция волн. Если уменьшать размеры отверстия в преграде на пути волны, то, чем меньше будут размеры отверстия, тем бо́льшие отклонения от прямолинейного направления распространения будут испытывать волны (рис. 228, *а*, *б*). Отклонение направления распространения волн от прямолинейного у границы преграды называется *дифракцией волн*.

Для наблюдения дифракции звуковых волн подключим громкоговорители к выходу звукового генератора и поставим на пути распространения звуковых волн экран из материала, поглощаю-



щего звуковые волны. Передвигая за экраном микрофон, можно обнаружить, что звуковые волны регистрируются и за краем экрана. Изменяя частоту звуковых колебаний и тем самым длину звуковых волн, можно установить, что явление дифракции становится более заметным при увеличении длины волны.

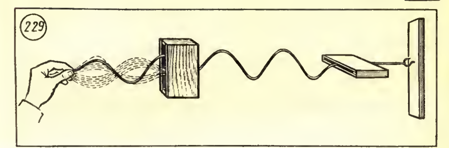
Дифракция волн происходит при их встрече с преградой любой формы и любых размеров. Обычно при больших по сравнению с длиной волны размерах препятствия или отверстия в преграде дифракция волн мало заметна. Наиболее отчетливо дифракция проявляется при прохождении волн через отверстие с размерами порядка длины волны или при встрече с препятствиями таких же размеров. При достаточно больших расстояниях между источником волн, преградой и местом наблюдения волн дифракционные явления могут иметь место и при больших размерах отверстия или преграды.

Принцип Гюйгенса — Френеля. Качественное объяснение явления дифракции можно дать на основе принципа Гюйгенса. Однако принцип Гюйгенса не может объяснить всех особенностей распространения волн. Поставим на пути плоских волн в волновой ванне преграду с широким отверстием. Опыт показывает, что волны проходят через отверстие и распространяются по первоначальному направлению луча. В остальных направлениях волны от отверстия не распространяются. Это противоречит принципу Гюйгенса, согласно которому вторичные волны должны распространяться во все стороны от точек, которых достигла первичная волна.

Поставим на пути волн широкую преграду. Опыт показывает, что за преграду волны не распространяются, что опять противоречит принципу Гюйгенса. Для объяснения явлений, наблюдаемых при встрече волн с преградами, французский физик О г ю с т е н Ф р е н е л ь (1788—1827) в 1815 г. дополнил принцип Гюйгенса представлениями о когерентности вторичных волн и их интерференции. Отсутствие волн в стороне от направления луча первичной волны за широким отверстием согласно принципу Гюйгенса — Френеля объясняется тем, что вторичные когерентные волны, испускаемые разными участками отверстия, интерферируют между собой. Волны отсутствуют в тех местах, в которых для вторичных волн от разных участков выполняются условия интерференционных минимумов.

Поляризация волн. Явления интерференции и дифракции на-





блюдаются как при распространении продольных, так и поперечных волн. Однако поперечные волны обладают одним свойством, которым не обладают продольные волны,— свойством *поляризации*.

Поляризованной волной называется такая поперечная волна, в которой колебания всех частиц происходят в одной плоскости. Плоскополяризованная волна в резиновом шнуре получается при колебаниях конца шнура в одной плоскости. Если же конец шнура колеблется в различных направлениях, то волна, распространяющаяся вдоль шнура, не поляризована.

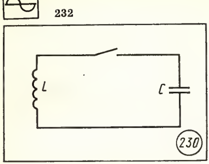
Поляризацию этой волны можно осуществить, поставив на ее пути преграду с отверстием в виде узкой щели. Щель пропускает только колебания шнура, происходящие вдоль нее. Поэтому волна после прохождения щели становится поляризованной в плоскости щели (рис. 229). Если далее на пути плоскополяризованной волны поставить вторую щель параллельно первой, то волна свободно проходит через нее. Поворот второй щели по отношению к первой на 90° останавливает процесс распространения волны в шнуре.

Устройство, выделяющее из всех возможных колебания, происходящие в одной плоскости (первая щель), называется *поляризатором*. Устройство, позволяющее определить плоскость поляризации волны (вторая щель), называется *анализатором*.

66. СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Превращение энергии в колебательном контуре. Электрическим колебательным контуром называется система, состоящая из конденсатора и катушки, соединенных между собой в замкнутую электрическую цепь (рис. 230). При подключении обкладок заряженного конденсатора к концам катушки в последней возникает электрический ток и энергия электрического поля заряженного конденсатора начинает превращаться в энергию магнитного поля.

С течением времени конденсатор постепенно разряжается, напряжение на его обкладках



уменьшается, уменьшается и энергия электрического поля между обкладками. Сила тока в контуре не возрастает мгновенно, так как этому препятствует ЭДС самоиндукции в катушке. Постепенное увеличение силы тока сопровождается постепенным увеличением энергии магнитного поля катушки. В тот момент, когда конденсатор полностью разрядится н энергия электрического поля станет равной нулю, сила тока в катушке и энергия магнитного поля достигнут максимальных значений. После разрядкн конденсатора и исчезновения внешнего электрического поля сила тока в катушке начинает убывать. Мгновенному прекращению тока препятствует ЭДС самоиндукции, создающая электрический ток того же направления. Ток, создаваемый ЭДС самонндукции катушки, заряжает обкладки конденсатора до первоначального значения напряжения между ннми; при этом знак заряда на обкладках оказывается противоположным первоначальному. Такнм образом энергия магнитного поля

тока в катушке превращается в энергию электрического поля заряженного конденсатора. Затем вновь происходит разряд конденсатора через катушку и т. д.— процесс периодически повторяется (рис. 231).

Периодически повторяющиеся изменения силы тока в катушке и напряжения между обкладками конденсатора без потребления энергии от внешних источников называются *свободными электромагнитными колебаниями.*

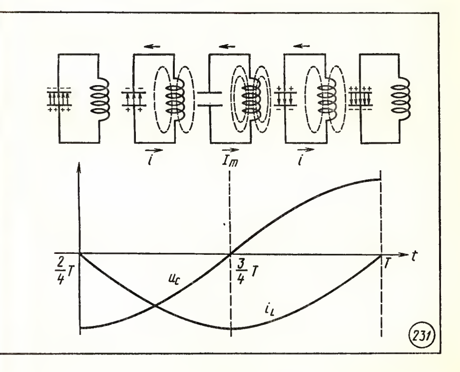
Период свободных колебаний в электрическом контуре. Рассчитаем период свободных колебаний в идеальном электрическом контуре, состоящем из конденсатора с электроемкостью C и катушки с индуктивностью L. Работа сил электростатического поля по любому замкнутому пути равна нулю. При перемещении заряда q по электрическому контуру эта работа равна

$$A = qU_C + qU_L = 0.$$

Следовательно, в любой момент времени напряжение U_C на обкладках конденсатора равно по абсолютному значению и противоположно по знаку напряжению U_L на концах катушки:

$$U_C = -U_L. \qquad (66.1)$$

Если катушка «идеальная», т. е. ее электрическое сопротивление равно нулю, то под действием напряжения U_L сила тока изменяется таким образом, что в любой момент времени вектор на-



пряженности индукционного электрического поля в проводнике равен по модулю и противоположен по направлению вектору напряженности электростатического поля. Поэтому напряжение на концах катушки равно ЭДС самоиндукции с противоположным знаком $(-U_L = \mathscr{E}_{is})$. Напряжение на обкладках конденсатора равно $U_C = \frac{q}{C}$. Выражение (66.1) можно представить так:

$$\frac{q}{C} = -Li'. \qquad (66.2)$$

Используя соотношение $i = q'$, уравнение (66.2) перепишем в виде

$$\frac{q}{C} = -Lq'',$$

или

$$q'' = -\frac{1}{LC}q. \qquad (66.3)$$

Решением уравнения (66.3) является функция

$$q = q_0 \cos \omega t, \qquad (66.4)$$

где

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \qquad (66.5)$$

Мы получили, что процессы зарядки и разрядки конденсатора при возникновении свободных колебаний в электрическом контуре происходят по гармоническому закону (см. задний форзац). Период $T = \frac{2\pi}{\omega}$ свободных колебаний в электрическом контуре определяется значениями электроемкости C конденсатора и индуктивности L катушки:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \qquad (66.6)$$

Уравнение (66.6), определяющее значение периода свободных электромагнитных колебаний в электрическом контуре, называется *формулой Томсона.*

Формула Томсона показывает, что период свободных электромагнитных колебаний в электрическом контуре прямо пропорционален корню квадратному из значений индуктивности катушки и электроемкости конденсатора.

Из выражения (66.4) следует, что при возникновении свободных электрических колебаний в контуре сила тока в контуре $(i = q')$ и напряжение на конденсаторе $\left(u = \frac{q}{C}\right)$ изменяются с течением времени по гармоническому закону, т. е. по закону синуса или косинуса

$$i = -q_0\omega \sin \omega t; \qquad (66.7)$$

$$u = \frac{q_0}{C} \cos \omega t. \qquad (66.8)$$

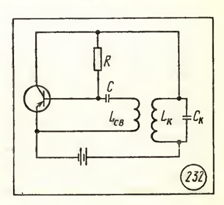
67. АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР НЕЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

После однократной зарядки конденсатора в колебательном контуре возникают гармонические колебания, частота колебаний определяется параметрами контура. Электромагнитные колебания в любом реальном контуре быстро затухают из-за потерь энергии на нагревание проводок и излучение электромагнитных волн. Для поддержания незатухающих электромагнитных колебаний в контуре необходимо пополнять запасы энергии в нем. Это можно сделать, периодически подключая конденсатор контура к источнику постоянного тока. Трудность заключается в том, что электрические колебания в контуре происходят с частотой сотни тысяч или миллионы герц. С такой частотой конденсатор нужно подключать к источнику постоянного тока и отключать от него; при этом согласуя моменты подключений обкладок конденсатора с моментами приобретения ими заряда, совпадающими по знаку со знаками полюсов подключаемого источника тока.

В качестве быстродействующего «ключа» для получения незатухающих высокочастотных колебаний может использоваться полупроводниковый транзистор. Через транзистор (рис. 232) конденсатор $C_к$ колебательного контура соединяется с источником постоянного тока. Пока на базу транзистора не подается управляющий сигнал, ток через него не проходит, конденсатор отключен от источника постоянного тока. При подаче управляющего сигнала на базу через транзистор протекает электрический ток и конденсатор колебательного контура заряжается от источника постоянного тока.

Для согласования моментов подключения колебательного контура к источнику постоянного тока с соответствующими моментами изменения напряжения на конденсаторе используется принцип обратной связи.

При зарядке и разрядке конденсатора колебательного контура изменения силы тока в катушке $L_к$ контура вызывают изменения магнитного поля вокруг нее. При этом происходят изменения магнитного потока и возникает ЭДС индукции во второй катушке $L_{св}$, называемой *катушкой обратной связи*. Один конец катушки обратной связи соединен с эмиттером транзистора, второй через конденсатор C — с его базой. Катушка обратной связи включена таким образом, что при увеличении силы тока в цепи коллектора на базу подается напряжение, отпирающее транзистор;





при уменьшении коллекторного тока — напряжение, запирающее транзистор. Такой тип связи называется *положительной обратной связью.*

Резистор R в цепи базы транзистора задает начальные значения силы тока базы и коллектора при отсутствии переменного напряжения на концах катушки связи $L_{\text{СВ}}$. Задание начального тока через транзистор позволяет усиливать как положительные, так и отрицательные сигналы, поступающие на вход транзистора.

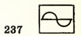
Если конденсатор колебательного контура имеет в начальный момент небольшой заряд и разряжается через катушку $L_{\text{К}}$, то в контуре возникают свободные электрические колебания малой амплитуды. Эти колебания через цепь обратной связи управляют коллекторным током транзистора, конденсатор колебательного контура через транзистор периодически получает дополнительный электрический заряд. При этом энергия электрического поля в конденсаторе увеличивается, растет амплитуда колебаний напряжения на конденсаторе колебательного контура.

Однако увеличение амплитуды колебаний напряжения в электрическом контуре не продолжается беспредельно. Объясняется это нелинейной зависимостью напряжения на выходе транзистора от напряжения на его входе. При возрастании напряжения между базой и эмиттером сила тока через транзистор увеличивается, однако это возрастание с увеличением напряжения между базой и эмиттером становится все меньше. При некотором значении амплитуды колебаний напряжения между базой и эмиттером возрастание амплитуды коллекторного тока прекращается. При этом потери энергии в колебательном контуре за период компенсируются поступлением энергии в контур от источника тока.

Рассмотренный генератор незатухающих электромагнитных колебаний является примером *автоколебательной системы.* Автоколебательной называется система, состоящая из элемента, в котором могут происходить свободные колебания источника энергии, элемента, управляющего поступлением энергии от источника к колебательной системе, и устройства, обеспечивающего положительную обратную связь колебательной системы с управляющим элементом. Особенностью автоколебательной системы является поддержание колебаний постоянной амплитуды за счет автоматического пополнения энергии в колебательной системе от внутреннего источника.

В транзисторном генераторе элементом, в котором могут происходить свободные колебания, является электрический контур; источником энергии для поддержания незатухающих колебаний может быть гальваническая батарея, аккумулятор или другой источник постоянного тока.

Управляющим элементом в автогенераторе является транзистор, обратная связь осуществляется с помощью катушки $L_{\text{СВ}}$, индуктивно связанной с катушкой $L_{\text{К}}$ электрического колебательного контура.



68. ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

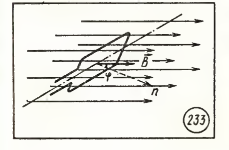
Вынужденные электромагнитные колебания. Электрические лампы в наших квартирах и на улице, холодильник и пылесос, телевизор и магнитофон работают, используя энергию электромагнитных колебаний.

На применении электромагнитных колебаний основана работа электромоторов, приводящих в действие станки на заводах и фабриках, движущих электровозы.

Во всех этих примерах речь идет об использовании *переменного электрического тока.* Переменный электрический ток в энергетических электрических цепях является результатом возбуждения в них вынужденных электромагнитных колебаний. Эти вынужденные колебания создаются генераторами переменного тока, работающими на электростанциях.

Виток в однородном магнитном поле. Для выяснения принципа действия генератора переменного тока рассмотрим сначала, что происходит при вращении витка провода в однородном магнитном поле.

Пусть плоский виток имеет площадь S и вектор $\vec{B}$ индукции составляет с перпендикуляром $\vec{n}$ к плоскости витка угол φ (рис. 233).



Магнитный поток Φ через площадь витка в этом случае определяется следующим выражением:

$$\Phi = BS\cos\varphi. \qquad (68.1)$$

При вращении витка с частотой ν угол φ изменяется по закону $\varphi = 2\pi\nu t$, тогда выражение (68.1) примет вид

$$\Phi = BS\cos 2\pi\nu t = BS\cos\omega t. \qquad (68.2)$$

Изменения магнитного потока создают ЭДС индукции e в витке, согласно закону электромагнитной индукции равную производной потока магнитной индукции, взятой со знаком минус:

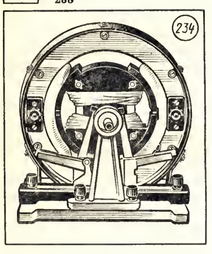
$$e = -\Phi'. \qquad (68.3)$$

Следовательно, изменения ЭДС индукции со временем будут происходить по гармоническому закону:

$$e = BS\omega\sin\omega t. \qquad (68.4)$$

Если с помощью контактных колец и скользящих по ним щеток соединить концы витка с электрической цепью, то под действием этой ЭДС индукции в электрической цепи возникнут вынужденные гармонические колебания силы тока — переменный ток.

Машинный генератор переменного тока. В машинных генераторах переменного тока магнитное поле обычно создается электромагнитом, питаемым постоянным током. Допустимая сила тока ограничивается нагреванием скользящих контактов ще-



ток. Поэтому в генераторах переменного тока большой мощности электромагнит является ротором, т. е. вращающейся частью машины (рис. 234). При вращении ротора возникает переменная ЭДС индукции в обмотках, расположенных в неподвижной части генератора — в статоре. Для увеличения ЭДС индукции используется обмотка статора с большим числом витков. Для увеличения магнитного потока эту обмотку наматывают на стальной сердечник и зазор между сердечниками статора и ротора делают как можно меньшим.

Если внутреннее сопротивление источника тока, т. е. сопротивление проводов обмотки статора, значительно меньше сопротивления внешней электрической цепи, то напряжение u на выходе генератора можно считать равным по абсолютному значению ЭДС индукции в n последовательно включенных витках обмотки:

$$u = ne = nBS\omega \sin \omega t. \quad (68.5)$$

Самый мощный в мире турбогенератор переменного тока изготовлен для Костромской ГРЭС на Ленинградском заводе «Электросила». Его мощность — 1,2 млн. кВт.

Тепловая электростанция. Более 90% используемой человечеством энергии получается за счет сжигания угля, нефти, газа. Наиболее удобной для распределения между потребителями является электрическая энергия переменного тока. Для преобразования энергии химического горючего в электроэнергию используются тепловые электростанции. На тепловой электростанции освобождаемая при сжигании топлива энергия расходуется на нагревание воды, превращение ее в пар и нагревание пара. Струя пара высокого давления направляется на лопатки ротора паровой турбины и заставляет его вращаться. Вращающийся ротор турбины приводит во вращение ротор генератора электрического тока. Генератор переменного тока осуществляет превращение механической энергии в энергию электрического тока.

Преобразование энергии переменного тока. При использовании переменного тока преобразования энергии не заканчиваются превращением механической энергии вращающегося ротора генератора в энергию электромагнитных колебаний переменного тока.

Переменный ток от генератора по проводам поступает к различным потребителям электрической энергии. Термин «потребитель электроэнергии» не означает, что существуют приборы или устрой-



ства, в которых энергия исчезает. Закон сохранения и превращения энергии строго выполняется в любых физических процессах, происходящих в природе и технике. В любом потребителе энергия переменного тока не исчезает, а лишь превращается из одной формы в другую в равной количественной мере. С помощью электродвигателя переменного тока происходит преобразование энергии электромагнитных колебаний в механическую энергию, а в лампах накаливания, в спиралях электрических плит и электрических печей электрическая энергия переменного тока преобразуется во внутреннюю энергию нагреваемых тел.

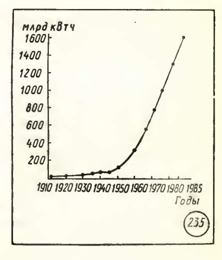
Успехи и перспективы развития электроэнергетики СССР. Производство и использование электрической энергии в промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте играют исключительно важную роль в развитии человеческого общества. В. И. Ленин создал учение об электрификации как необходимой материально-технической базе построения коммунистического общества. Ленинские идеи электрификации страны получили конкретное воплощение в плане ГОЭЛРО — первом едином государственном перспективном плане восстановления и развития народного хозяйства Советской Республики, разработанном под руководством В. И. Ленина в 1920 г. План был рассчитан на 10—15 лет и предусматривал коренную реконструкцию народного хозяйства на базе электрификации. Намечалось строительство 30 районных электростанций общей мощностью 1,5 млн. кВт с годовой выработкой электроэнергии 8,8 млрд. кВт·ч. План ГОЭЛРО был в основном выполнен к 1931 г. В процессе подготовки плана ГОЭЛРО В. И. Ленин определил важнейшие принципы электрификации народного хозяйства страны:

— широкое использование для производства электроэнергии местных непервоклассных сортов топлива и водной энергии;

— осуществление концентрации и централизации энергоснабжения путем строительства мощных электростанций и высоковольтных линий электропередач, объединяющих тепловые и гидравлические станции;

— широкое применение электроэнергии не только в промышленности, но и в сельскохозяйственном производстве, на транспорте.

Ленинские идеи электрификации страны полностью реализуются в наши дни. На рисунке 235 представлена диаграммой



годовая выработка электроэнергии в стране с 1913 по 1986 г. Годовое производство электроэнергии в стране выросло по сравнению с 1913 г. почти в 1000 раз и более чем в 3000 раз по сравнению с 1921 г.

Единичная мощность электрических генераторов с 0,5 тыс. кВт в 1924 г. возросла до 1200 тыс. кВт, т. е. увеличилась в 2400 раз. Увеличение единичной мощности турбогенераторов ведет к снижению затрат материалов на их сооружение и строительство зданий, уменьшению числа обслуживающих работников. Все это обеспечивает снижение себестоимости производства электроэнергии.

В 1987 г. в стране выработано 1665 млрд. кВт·ч электроэнергии. Основными направлениями экономического и социального развития СССР планируется довести выработку электроэнергии в стране к 1990 г. до 1840—1880 млрд. кВт·ч.

При интенсивном развитии атомной энергетики и строительстве мощных гидроэлектростанций в настоящее время около 70% электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях. Основные энергетические запасы химического горючего и энергии рек расположены в восточных районах страны, а около 90% производимой в стране электроэнергии потребляется в европейской части страны. Это приводит к необходимости строительства сверхдальних линий электропередач. Продолжается формирование единой энергетической системы страны, в которой важная роль будет принадлежать межсистемным линиям электропередачи с напряжением 500, 750 и 1150 кВ переменного тока, 1500 кВ постоянного тока.

Планируется повысить производительность труда в электроэнергетике на 21—23% и снизить себестоимость электрической энергии на 4—5%.

69. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотрим процессы, происходящие в проводнике, включенном в цепь переменного тока. Если индуктивность проводника настолько мала, что индукционные электрические поля оказываются пренебрежимо малыми, то движение электрических зарядов в проводнике определяется действием электрического поля, напряженность которого в проводнике пропорциональна напряжению между концами проводника.

При изменении напряжения по гармоническому закону

$$u = U_m \cos \omega t \qquad (69.1)$$

напряженность электрического поля в проводнике изменяется по такому же закону. Под действием переменного электрического поля в проводнике возникает переменный электрический ток i, частота и фаза колебаний которого совпадают с частотой и фазой колебаний напряжения:

$$i = I_m \cos \omega t. \qquad (69.2)$$

Колебания силы тока в цепи являются вынужденными электрическими колебаниями, возникающими под действием приложенного переменного напряжения.

Мощность переменного тока. При совпадении фаз колебаний силы тока и напряжения мгновенная мощность переменного тока равна

$$p = iu \qquad (69.3)$$

или

$$p = I_m U_m \cos^2 \omega t. \qquad (69.4)$$

Среднее значение квадрата косинуса за период равно 0,5; поэтому средняя мощность равна

$$\bar{p} = \frac{I_m U_m}{2}. \qquad (69.5)$$

Действующие значения напряжения и силы тока. *Действующим значением силы тока I* называется сила постоянного тока, выделяющего в проводнике за то же время такое же количество теплоты, что и переменный ток. При амплитуде I_m гармонических колебаний силы тока действующее значение I силы тока равно

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \qquad (69.6)$$

Действующее значение переменного напряжения U в $\sqrt{2}$ раз меньше его амплитудного значения U_m:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \qquad (69.7)$$

Средняя мощность переменного тока $\bar{p}$ или просто мощность переменного тока P при совпадении фаз колебаний силы тока и напряжения определяется через действующее значение силы тока I и напряжения U выражением

$$P = IU. \qquad (69.8)$$

Активное сопротивление. *Активным сопротивлением R* называется физическая величина, определяемая отношением мощности P переменного тока на участке электрической цепи к квадрату действующего значения силы тока I на этом участке:

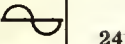
$$R = \frac{P}{I^2}. \qquad (69.9)$$

Отсюда средняя мощность на участке цепи переменного тока равна произведению квадрата действующего значения силы тока на активное сопротивление R участка цепи:

$$P = I^2 R. \qquad (69.10)$$

При небольших частотах переменного тока активное сопротивление проводника не зависит от частоты и практически совпадает с его электрическим сопротивлением в цепи постоянного тока.

Катушки и конденсаторы также обладают некоторым активным сопротивлением, так как проводники и диэлектрики нагреваются при пропускании переменного тока под действием переменного электрического поля.



70. ИНДУКТИВНОСТЬ И ЕМКОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Индуктивиость в цепи переменного тока. В любом проводнике, по которому протекает переменный ток, возиикает ЭДС самоиндукции. Поэтому ни одна электрическая цепь ие обладает только активным сопротивлением.

В проводнике с малым активным сопротивлением и большой индуктивностью L при изменении силы тока по гармоническому закону (69.2) $i=I_m \cos \omega t$ напряжение на концах изменяется также по гармоническому закону. Так как напряжение на концах идеальной катушки равно по модулю и противоположно по знаку ЭДС самоиндукции

$$-u=\mathscr{E}_{is},\ \mathscr{E}_{is}=-Li',\ u=Li',$$

то колебания напряжения на катушке описываются уравнением

$$u=-I_m L\omega \sin \omega t$$

или

$$u=I_m L\omega \cos\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right), \qquad (70.1)$$

т. е. колебания напряжения опережают по фазе колебания силы тока на $\pi/2$. Произведение $I_m L\omega$ является амплитудой колебаний напряжения:

$$U_m=I_m L\omega. \qquad (70.2)$$

Индуктивное сопротивление. Произведение циклической частоты ω на индуктивность L называют *индуктивным сопротивлением.* Обозначив индуктивное сопротивление X_L, запишем

$$X_L=\omega L. \qquad (70.3)$$

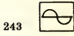
Связь между амплитудой U_m колебаний напряжения на концах проводника индуктивностью L с амплитудой I_m колебаний силы тока в нем совпадает по форме с выражением закона Ома для участка цепи постоянного тока:

$$I_m=\frac{U_m}{X_L}. \qquad (70.4)$$

Зависимость индуктивного сопротивления от частоты. Хотя выражения (43.3) и (70.4) совпадают по форме, между ними имеются принципиальные отличия по существу. Электрическое сопротивление проводника при данной температуре является постоянной величиной, характеризующей проводник. Индуктивное сопротивление X_L не является постоянной величиной, его значение прямо пропорционально частоте переменного тока. Поэтому амплитуда I_m колебаний силы тока в проводнике индуктивностью L при постоянном значении амплитуды U_m колебаний напряжения убывает обратно пропорционально частоте:

$$I_m=\frac{U_m}{\omega L}. \qquad (70.5)$$

Емкость в цепи переменного тока. Рассмотрим процессы, протекающие в электрической цепи переменного тока с конденсатором. При включении конденсатора последовательно с источником постоянного тока в цепи возникает кратковременный импульс тока, заряжающий конден-



сатор до напряжения нсточннка, а затем ток прекращается.

Если заряженный конденсатор отключнть от нсточннка постоянного тока н соедннить его обкладкн с выводами лампы накалнвания, то конденсатор будет разряжаться, при этом наблюдается кратковременная вспышка лампы.

При включенин конденсатора в цепь переменного тока, как н в случае цепн постоянного тока, через диэлектрнк, разделяющий обкладкн конденсатора, электрические заряды проходить не будут. Но в результате пернодически повторяющихся процессов зарядкн н разрядки конденсатора в проводах, соединенных с его выводами, появнтся переменный ток. Лампа накаливання, включенная последовательно с конденсатором в цепь переменного тока, кажется горящей непрерывно, так как человеческий глаз при высокой частоте колебаний снлы тока не замечает периодического ослаблення свечения ннтн лампы.

При изменениях напряжения на обкладках конденсатора по гармонническому закону:

$$u = U_m \cos \omega t \qquad (70.6)$$

заряд q на его обкладках нзменяется также по гармоническому закону:

$$q = U_m C \cos \omega t. \qquad (70.7)$$

Электрический ток в цепи возннкает в результате изменення заряда q конденсатора, поэтому колебания снлы тока в цепн будут происходнть по закону:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \text{ нли } i = q'(t), \text{ т. е.}$$

$$i = -U_m \omega C \sin \omega t =$$

$$= U_m \omega C \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (70.8)$$

Сравненне выражений (70.6) н (70.8) показывает, что гармоннческие колебания напряження на обкладках конденсатора в цепи переменного тока отстают по фазе от колебаний силы тока на $\pi/2$.

Произведенне $U_m \omega C$ является амплитудой колебаний снлы тока:

$$I_m = U_m \omega C. \qquad (70.9)$$

Емкостное сопротивленне. Велнчнну, обратную произведенню циклической частоты ω на электроемкость C конденсатора, называют ***емкостным сопротивлением*** конденсатора. Обозначив емкостное сопротнвленне X_C, запншем

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \qquad (70.10)$$

Связь между амплитудным значеннем снлы тока I_m н амплитудным значеннем напряжения U_m по форме совпадает с выраженнем закона Ома для участка цепи постоянного тока, в котором вместо электрического сопротнвлення R нспользуется емкостное сопротнвление конденсатора X_C:

$$I_m = \frac{U_m}{X_C}. \qquad (70.11)$$

Для действующнх значенний напряження н снлы тока выполняется такое же соотношение.

Как и индуктивное сопротивление X_L катушки, емкостное сопротивление X_C конденсатора не является постоянной величиной. Его значение обратно пропорционально частоте переменного тока. Поэтому амплитуда I_m колебаний силы тока в цепи конденсатора при постоянной амплитуде колебаний напряжения на конденсаторе возрастает прямо пропорционально частоте ω.

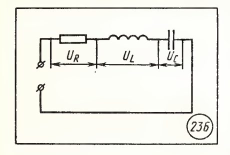
71. РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Если к выводам электрической цепи из последовательно соединенных активного сопротивления, конденсатора и катушки (рис. 236) подвести переменное напряжение, то в цепи возникают вынужденные электрические колебания силы тока и напряжения.

Емкостное сопротивление X_C конденсатора и индуктивное сопротивление X_L катушки зависят от частоты ω приложенного напряжения. Поэтому при постоянной амплитуде U_m колебаний напряжения амплитуда I_m колебаний силы тока в цепи зависит от частоты ω переменного напряжения.

При постепенном увеличении (от нуля) частоты приложенного напряжения емкостное сопротивление X_C конденсатора уменьшается. Это приводит к возрастанию амплитуды колебаний силы тока. В противоположность емкостному сопротивлению индуктивное сопротивление катушки с увеличением частоты возрастает. Увеличение амплитуды колебаний силы тока в цепи при увеличении частоты приложенного напряжения продолжается до тех пор, пока индуктивное сопротивление катушки не станет равным емкостному сопротивлению конденсатора:

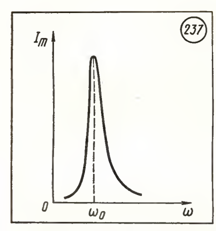
$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}. \qquad (71.1)$$



При выполнении условия (71.1), т. е. при равенстве индуктивного сопротивления катушки емкостному сопротивлению конденсатора, и одинаковой силе тока одинаковыми оказываются и амплитуды колебаний напряжения на конденсаторе и катушке. Колебания напряжения на катушке и конденсаторе противоположны по фазе, поэтому сумма напряжений на них при выполнении условия (71.1) в любой момент времени равна нулю. В результате напряжение на активном сопротивлении при резонансе оказывается равным полному напряжению:

$$U = U_R,$$

а сила тока в цепи достигает максимального значения, т. е. наступает резонанс.



При дальнейшем увеличении частоты индуктивное сопротивление катушки начинает превышать емкостное сопротивление конденсатора. Увеличение индуктивного сопротивления приводит к уменьшению амплитуды колебаний силы тока (рис. 237).

Из уравнения (71.1) следует, что электрический резонанс в последовательной цепи, содержащей конденсатор и катушку, наступает при частоте ω_0, равной

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \qquad (71.2)$$

Сравнение выражений (71.2) и (66.5) показывает, что резонансная частота ω_0 электрической цепи совпадает с собственной частотой свободных электрических колебаний в этой цепи.

72. ТРАНСФОРМАТОР

Передача электрической энергии. Передача электрической энергии от электростанции на значительное расстояние до большого города или промышленного центра является сложной научно-технической проблемой.

Потери энергии на нагревание проводов прямо пропорциональны квадрату силы тока в линии электропередачи. Поэтому для уменьшения потерь необходимо уменьшить силу тока в линии. Мощность тока равна произведению силы тока на напряжение. Чтобы при уменьшении силы тока в линии не уменьшалась передаваемая мощность, следует увеличить напряжение во столько же раз, во сколько раз была уменьшена сила тока.

При высоком напряжении переменный ток передается на большие расстояния с малыми потерями, но для использования на промышленных предприятиях, транспорте, в быту необходимо понижение напряжения. Повышение и понижение напряжения переменного тока осуществляются трансформаторами.

Трансформатор. Трансформатор был изобретен в 1878 г. русским ученым Павлом Николаевичем Яблочковым (1847—1894). Самый простой трансформатор переменного тока состоит из двух катушек.

Одна из катушек, концы которой подключаются к источнику переменного напряжения, называется первичной катушкой (обмоткой), другая — вторичной катушкой (обмоткой). При подключении выводов первичной катушки к источнику переменного



напряжения в катушке возникает переменный ток. Если напряжение изменяется со временем по гармоническому закону с частотой ω, то по гармоническому закону с той же частотой происходят изменения силы тока i в катушке и магнитного потока Φ, создаваемого этим током:

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t.$$

При изменениях магнитного потока в каждом витке провода первичной катушки возникает изменяющаяся по гармоническому закону ЭДС самоиндукции:

$$e = -\Phi'(t) = \omega \Phi_m \sin \omega t.$$

Произведение $\omega\Phi_m$ является амплитудой колебаний ЭДС в одном витке:

$$\mathscr{E}_m = \omega\Phi_m; \; e = \mathscr{E}_m \sin \omega t.$$

Если число витков в первичной катушке n_1, а ЭДС самоиндукции в одном витке равна e, то мгновенное значение ЭДС самоиндукции в первичной катушке равно

$$e_1 = en_1. \qquad (72.1)$$

Вторичную катушку пронизывает тот же самый магнитный поток, который проходит через первичную катушку. При изменениях магнитного потока в каждом ее витке возникает ЭДС индукции, изменяющаяся по гармоническому закону, амплитуда изменений ЭДС индукции в одном витке имеет такое же значение, что и ЭДС самоиндукции в одном витке первичной катушки. Если число витков провода вторичной катушки n_2, то мгновенное значение ЭДС в ней равно

$$e_2 = en_2. \qquad (72.2)$$

Отношение ЭДС самоиндукции e_1 в первичной катушке к ЭДС индукции e_2 во вторичной катушке равно отношению числа витков n_1 в первичной катушке к числу витков n_2 во вторичной катушке:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2}. \qquad (72.3)$$

Если активное сопротивление провода первичной катушки мало по сравнению с его индуктивным сопротивлением, то приложенное напряжение u_1 в любой момент времени примерно равно ЭДС самоиндукции, взятой с противоположным знаком.

При разомкнутой цепи вторичной катушки — режим холостого хода трансформатора — напряжение u_2 на ее концах в любой момент времени равно ЭДС индукции e_2, взятой с противоположным знаком. Поэтому из выражения (72.3) следует, что

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2}. \qquad (72.4)$$

Это отношение называется коэффициентом трансформации K:

$$K = \frac{n_1}{n_2}.$$

При $K > 1$ трансформатор понижающий, при $K < 1$ — повышающий.

При подключении нагрузки к концам вторичной катушки во вторичной цепи возникает переменный ток. Мощность тока в первичной и вторичной цепях, если пренебречь потерями, одинакова. Поэтому увеличение напряжения на выходе повышаю-

щего трансформатора в K раз сопровождается уменьшением силы тока во вторичной катушке в K раз. Трансформаторы для преобразования переменных токов больших мощностей обладают высоким КПД, достигающим 98—99,5%. Снижение КПД трансформатора обусловлено потерями энергии на нагревание проводов его обмоток и стального сердечника. Сердечник нагревается в результате перемагничивания и возникновения в нем вихревых индукционных токов. Для уменьшения вихревых токов сердечники трансформаторов обычно изготавливают из тонких стальных листов, изолированных друг от друга. Это приводит к значительному увеличению электрического сопротивления сердечника и уменьшению потерь на его нагревание вихревыми токами.

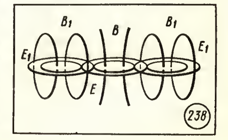
73. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

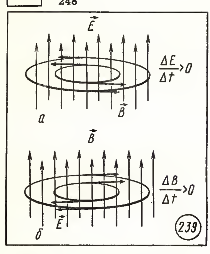
Гипотеза Максвелла. Различные виды механических волн, как поперечных, так и продольных, объединяет одно общее свойство: они могут распространяться только в непрерывной среде, только в твердых телах, жидкостях или газах. В вакууме, т. е. в пустоте, механические волны распространяться не могут.

Английский физик Д ж е й м с М а к с в е л л (1831—1879) на основании изучения экспериментальных работ Фарадея по электричеству и магнетизму в 1864 г. высказал гипотезу о существовании в природе особых волн, способных распространяться в вакууме. Эти волны Максвелл назвал электромагнитными волнами.

Для выдвижения гипотезы о возможности возникновения электромагнитных волн Максвелл имел следующие основания. В 1831 г. Фарадей установил, что любое изменение магнитного потока в контуре вызывает появление в нем индукционного тока. Максвелл объяснил появление индукционного тока возникновением вихревого электрического поля при любом изменении магнитного поля. Далее он предположил, что электрическое поле обладает такими же свойствами: при любом изменении электрического поля в окружающем пространстве возникает вихревое магнитное поле. Однажды начавшийся процесс взаимного порождения магнитного и электрического полей должен далее непрерывно продолжаться и захватывать все новые и новые области в окружающем пространстве (рис. 238).

Процесс распространения переменных магнитного и электрического полей и есть электромагнитная волна. Связь направлений векторов напряженности электри-





ческого поля и индукции магнитного поля при возрастании напряженности и индукции представлена на рисунке 239, *а* и *б*. При убывании напряженности и индукции соответствующие векторы имеют противоположное направление.

Электрическое и магнитное поля могут существовать не только в веществе, но и в вакууме. Поэтому должно быть возможным распространение электромагнитной волны в вакууме.

Условие возникновения электромагнитных волн. Изменения магнитного поля происходят при изменении силы тока в проводнике, а сила тока в проводнике изменяется при изменении скорости движения электрических зарядов в нем, т. е. при движении зарядов с ускорением. Следовательно, электромагнитные волны должны возникать при ускоренном движении электрических зарядов.

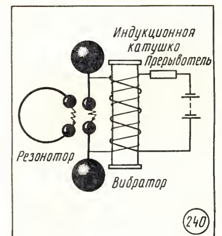
Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме по расчетам Максвелла должна быть равной примерно 300 000 км/с.

Открытие электромагнитных волн. Электромагнитные волны были впервые экспериментально обнаружены немецким физиком Генрихом Герцем (1857—1894) в 1887 г. В его опытах ускоренное движение электрических зарядов возбуждалось в двух металлических стержнях с шарами на концах. При сообщении шарам достаточно больших разноименных зарядов между ними происходил электрический разряд. В результате шары перезаряжались, между ними вновь проскакивала искра и т. д. — процесс повторялся многократно, т. е. возникали электрические колебания.

Стержни с шарами на концах обладают определенной индуктивностью и электроемкостью и представляют собой электрический колебательный контур. Поместив на некотором расстоянии от этого контура контур из проволоки с двумя шарами на концах, Герц обнаружил, что при проскакивании искры между шарами колебательного контура возникает искра и между шарами на концах витка провода (рис. 240). Следовательно, при электрических колебаниях в открытом контуре в пространстве вокруг него образуется вихревое электрическое поле. Это поле создает электрический ток во вторичном контуре.

При постепенном удалении вторичного контура от первичного искры между шарами возникали только при расположении контура в определенных местах прост-





ранства, разделенных одинаковыми расстояниями. Этот факт Герц объяснил явлением интерференции излученных электромагнитных волн с электромагнитными волнами, отраженными от стены комнаты.

Искры во вторичном контуре наблюдались в тех местах комнаты, в которые первичная и отраженная электромагнитные волны приходили в одинаковой фазе и амплитуда колебаний напряженности вихревого электрического поля была максимальной. Расстояние между двумя соседними интерференционными максимумами равно половине длины волны.

По известной частоте ν электромагнитных колебаний в контуре и измеренному значению длины λ электромагнитной волны Герц определил скорость распространения электромагнитной волны:

$$v = \nu\lambda.$$

Она оказалась равной примерно 300 000 км/с, как и предсказывал Максвелл. Таким образом опыты Герца явились экспериментальным подтверждением гипотезы Максвелла о существовании электромагнитных волн.

Свойства электромагнитных волн. Свойства электромагнитных волн во многом сходны со свойствами механических волн. На границе раздела двух сред электромагнитные волны частично отражаются, частично проходят во вторую среду. От поверхности диэлектрика электромагнитные волны отражаются слабо, от поверхности металла отражаются почти без потерь (рис. 241).

Закон отражения совпадает с законом отражения механических волн, т. е. угол отражения равен углу падения; падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к поверхности в точке падения лежат в одной плоскости. На границе раздела двух сред происходит преломление электромагнитных волн. Закон преломления: отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β является величиной постоянной для двух данных сред. Это отношение равно отношению скорости v_1 электромагнитных волн в первой среде к скорости v_2 во второй среде:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}.$$

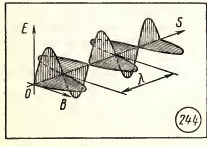
У края преграды или при прохождении электромагнитных волн через отверстие наблюдается явление дифракции волн, т. е. отклонение направления их распространения от прямолинейного (рис. 242).

Когда электромагнитные волны от двух когерентных источ-

241

242

243



244

ников встречаются в одной точке, то наблюдается явление интерференции.

Опыты с пропусканием электромагнитных волн через систему из двух решеток показывают, что при параллельной ориентации металлических стержней в двух решетках электромагнитные волны проходят через них (рис. 243), а при взаимно перпендикулярной ориентации стержней волны не проходят. Это доказывает, что электромагнитные волны являются поперечными волнами.

При распространении электромагнитной волны векторы напряженности $\vec{E}$ и магнитной индукции $\vec{B}$ перпендикулярны направлению распространения волны и взаимно перпендикулярны между собой (рис. 244).

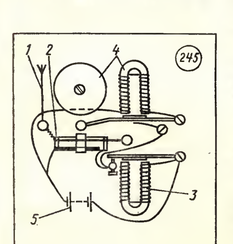
74. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

Изобретение радио. Возможность практического применения электромагнитных волн для установления связи без проводов продемонстрировал 7 мая 1895 г. знаменитый русский физик Александр Степанович Попов (1859—1906). Этот день считается днем рождения радио.

Приемник А. С. Попова состоял из антенны *1*, когерера *2*, электромагнитного реле *3*, электрического звонка *4* и источника постоянного тока *5* (рис. 245). Электромагнитные волны вызывали вынужденные колебания тока и напряжения в антенне. Переменное напряжение с антенны подавалось на два электрода, которые были расположены в стеклянной трубке, заполненной металлическими опилками. Эта трубка и есть когерер. Последовательно с когерером включались электромагнитное реле и источник постоянного тока.

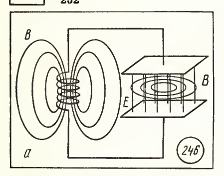
Из-за плохих контактов между опилками сопротивление когерера обычно велико, поэтому электрический ток в цепи мал и реле цепь звонка не замыкает. Под действием переменного напряжения высокой частоты в когерере возникают электрические разряды между отдельными опилками, частицы опилок спекаются и его сопротивление уменьшается в 100—200 раз. Сила тока в катушке электромагнитного реле возрастает, и реле включает электрический звонок. Так регистрируется прием электромагнитной волны антенной.

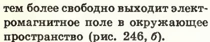
Удар молоточка звонка по когереру встряхивал опилки и возвращал его в исходное состояние, приемник снова был готов к регистрации электромагнитных волн.



Открытый колебательный контур. Для осуществления радиосвязи необходимо обеспечить возможность излучения электромагнитных волн. Если электромагнитные колебания возникают в контуре из катушки и конденсатора, то переменное магнитное поле оказывается связанным с катушкой, а переменное электрическое поле — сосредоточенным в пространстве между пластинами конденсатора (рис. 246, *а*). Такой контур называется закрытым. Закрытый колебательный контур практически не излучает электромагнитные волны в окружающее пространство.

Если контур состоит из катушки и двух пластин плоского конденсатора, не параллельных друг другу, то чем под бо́льшим углом развернуты эти пластины,

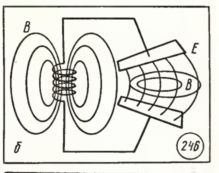


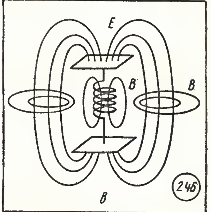

тем более свободно выходит электромагнитное поле в окружающее пространство (рис. 246, *б*).

Предельным случаем раскрытия колебательного контура является удаление пластин конденсатора на противоположные концы прямой катушки. Такая система называется открытым колебательным контуром (рис. 246, *в*). Изображение пластин конденсатора на концах катушки открытого колебательного контура на рисунке 246 является лишь условностью. В действительности контур состоит из катушки и длинного провода — антенны. Один конец антенны заземлен, второй поднят над поверхностью земли.

Катушка антенны имеет индуктивную связь с катушкой колебательного контура генератора незатухающих электромагнитных колебаний. Вынужденные колебания высокой частоты в антенне создают в окружающем пространстве переменное электромагнитное поле. Со скоростью 300 000 км/с электромагнитные волны распространяются от антенны.

Энергия излучаемых электромагнитных волн при одинаковой амплитуде колебаний силы тока в антенне пропорциональна четвер-





той степени частоты колебаний. На частотах в десятки, сотни и даже тысячи герц интенсивность излучения электромагнитных волн ничтожно мала. Поэтому для осуществления радио- и телевизионной связи используются электромагнитные волны с частотой от нескольких сотен тысяч герц до сотен тысяч мегагерц.

Амплитудная модуляция. При передаче по радио речи, музыки и других звуковых сигналов применяются различные виды *модуляции* гармонических колебаний высокой частоты.

Для осуществления *амплитудной модуляции* электромагнитных колебаний высокой частоты



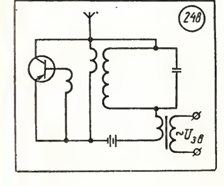
а

б

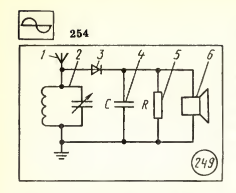
в

247

(рис. 247, *а*) в электрическую цепь транзисторного генератора последовательно с колебательным контуром включают катушку трансформатора (рис. 248). На вторую катушку трансформатора подается переменное напряжение звуковой частоты, например, с выхода микрофона после необходимого усиления. Переменный ток во второй катушке трансформатора вызывает появление переменного напряжения на концах первой катушки трансформатора. Переменное напряжение звуковой частоты (рис. 247, *б*) складывается с постоянным напряжением источника тока; изменения напряжения между эмиттером и коллектором транзистора приводят к изменениям со звуковой частотой амплитуды колебаний силы тока высокой частоты в контуре генератора (рис. 247, *в*). Такие колебания высокой частоты называются *амплитудно-модулированными*.



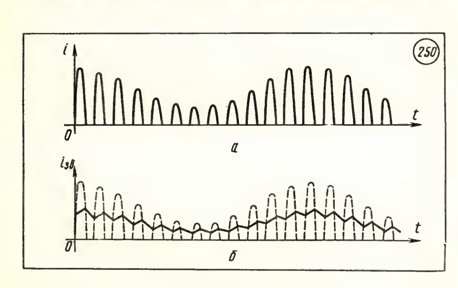
С колебательным контуром генератора индуктивно связана антенна радиопередатчика. Вынужденные колебания тока высокой



частоты, происходящие в антенне, создают электромагнитные волны.

Радиоприемник. Электромагнитные волны, излученные антенной радиопередатчика, вызывают вынужденные колебания свободных электронов в любом проводнике. Напряжение между концами проводника, в котором электромагнитная волна возбуждает вынужденные колебания электрического тока, пропорционально длине проводника. Поэтому для приема электромагнитных волн в простейшем детекторном радиоприемнике применяется длинный провод — *приемная антенна 1* (рис. 249). Вынужденные колебания в антенне возбуждаются электромагнитными волнами от всех радиостанций. Для того чтобы слушать только одну радиопередачу, колебания напряжения не направляют непосредственно на вход усилителя, а сначала подают на *колебательный контур 2* с изменяющейся собственной частотой колебаний. Изменение собственной частоты колебаний в контуре приемника производится обычно изменением электроемкости переменного конденсатора. При совпадении частоты вынужденных колебаний в антенне с собственной частотой колебаний контура наступает резонанс, при этом амплитуда вынужденных колебаний напряжения на обкладках конденсатора контура достигает максимального значения. Таким образом из большого числа электромагнитных колебаний, возбуждаемых в антенне, выделяются колебания нужной частоты.

С колебательного контура приемника модулированные колеба-





ния высокой частоты поступают на *детектор 3*. В качестве детектора можно использовать полупроводниковый диод, пропускающий переменный ток высокой частоты только в одном направлении. После прохождения детектора сила тока в цепи изменяется во времени по закону, представленному на рисунке 250, *а*. В течение каждого полупериода высокой частоты импульсы тока заряжают конденсатор *4*, вместе с тем конденсатор медленно разряжается через резистор *5*. Если значения электроемкости конденсатора и электрического сопротивления резистора выбраны правильно, то через резистор будет протекать ток, изменяющийся во времени со звуковой частотой, использованной при модуляции колебаний в радиопередатчике (рис. 250, *б*). Для преобразования электрических колебаний в звуковые переменное напряжение звуковой частоты подается на телефон *6*.

Детекторный радиоприемник весьма несовершенен. Он обладает очень низкой чувствительностью и поэтому может успешно принимать радиопередачи только от мощных радиостанций или от близко расположенных радиопередатчиков.

Для повышения чувствительности в современных радиоприемниках сигнал с колебательного контура поступает на вход усилителя высокой частоты (УВЧ), а с выхода усилителя высокочастотные электрические колебания поступают на детектор. Для увеличения мощности звукового сигнала на выходе радиоприемника электрические колебания звуковой частоты с выхода детектора поступают на вход усилителя низкой частоты (УНЧ).

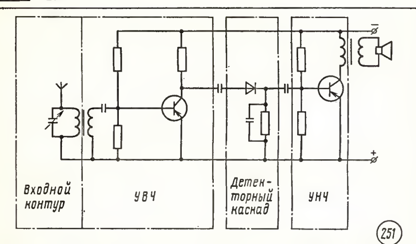
Переменное напряжение звуковой частоты с выхода УНЧ подается на обмотку электродинамического громкоговорителя — динамика. Динамик преобразует энергию переменного тока звуковой частоты в энергию звуковых колебаний.

Для усиления электрических колебаний высокой и низкой частот могут быть использованы схемы с электронными лампами или транзисторами.

Схема устройства простейшего радиоприемника с усилителями высокой и низкой частот представлена на рисунке 251.

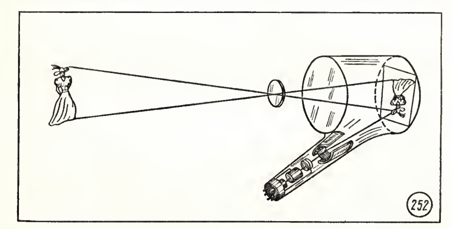
Для настройки на прием только одной станции в современных радиоприемниках используются довольно сложные электронные схемы, включающие в себя генераторы электромагнитных колебаний. Сложение электрических колебаний от внутреннего генератора приемника с колебаниями, возбужденными в контуре приемника электромагнитными волнами от передающих радиостанций, позволяет настраивать приемник на очень узкий диапазон принимаемых частот. Внутренний генератор в приемнике называется гетеродином, а приемник с таким генератором называется супергетеродинным радиоприемником.

Телевидение. С помощью радиоволн осуществляется передача на расстояние не только звуковых сигналов, но и изображений предмета. Принцип передачи движущихся черно-белых и цветных изображений с по-

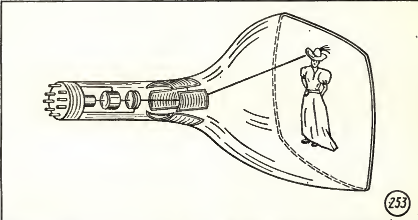


мощью телевизионных передатчиков и приемников заключается в следующем.

Для передачи одного кадра телевизионного изображения с помощью объектива в телевизионной камере получается изображение предмета на экране специального электровакуумного прибора — передающей трубки (рис. 252). Под действием света участки экрана приобретают положительные заряды. На экран внутри передающей трубки направляется электронный луч, перемещающийся периодически слева направо по 625 горизонтальным линиям — строкам. Во время пробегания луча вдоль строки происходит нейтрализация электрических зарядов на отдельных участках экрана и в электрической цепи, соединяющей электронную пушку и экран, протекает импульс тока. Изменения силы тока в импульсе соответствуют изме-







ненням освещенности экрана на пути электронного луча.

Высокочастотные электромагнитные колебаиня в телевизнонном передатчике модулнруются сигналом импульса, полученного на выходе передающей трубкн, и подаются на антенну передатчика. Аитенна излучает электромагнитиые волны.

В телевизионном приемнике — телевизоре — имеется электровакуумная трубка, иазываемая кинескопом. В кнескопе электроиная пушка создает электроиный луч. Электроны под действнем электрического поля движутся внутри трубкн к экрану, покрытому кристаллами, способиыми светиться под ударамн быстродвнжущихся электронов. На пути к экрану электроны пролетают через магнитные поля двух пар катушек, расположенных снаружи трубкн.

Магнитное поле одиой пары катушек вызывает отклоненне электронного луча по горнзонтали, второй — по вертикалн. Периодическне измеиения силы тока в катушках вызывают нзменения магнитных полей, в результате которых электронный луч за $\frac{1}{25}$ секунды 625 раз пробегает по экрану слева направо и один раз — сверху вниз (рнс. 253).

Во время движения луча вдоль первой строкн силой тока в электронном луче управляет сигнал, принятый приемником от передатчика во время двнжения луча в передающей трубке по первой строке; при движении луча по второй строке силой тока в луче управляет снгнал от второй строкн и т. д. В результате за $\frac{1}{25}$ с луч «рисует» такое же изображение на экране телевизора, какое построено объективом иа экране передающей трубкн. Кадры сменяют друг друга с частотой 25 кадров в секунду, последовательность сменяющих друг друга с высокой частотой кадров воспринимается глазом человека как непрерывное движенне.

9 Заказ 937

Телевизионные передачи ведутся в диапазоне от 50 МГц до 230 МГц. В этом диапазоне электромагнитные волны распространяются почти только в пределах прямой видимости. Поэтому для обеспечения передачи телевизионных сигналов на далекие расстояния строят высокие антенны. Передающие антенны студий Центрального телевидения СССР установлены на вершине Останкинской башни высотой 540 м. Такая высота обеспечивает прием телевизионных передач на расстояниях до 120 км от Москвы.

Передача телевизионных сигналов в любую точку нашей страны осуществляется с помощью ретрансляционных искусственных спутников Земли в системе «Орбита».

Передача и прием цветных изображений требуют применения более сложных телевизионных систем. Вместо одной передающей трубки требуется применять три трубки, передающие сигналы трех одноцветных изображений — красного, синего и зеленого цветов.

В отличие от черно-белого телевизора экран кинескопа цветного телевизора покрыт кристаллами люминофоров трех сортов. Одни кристаллы при попадании на них электронного луча светятся красным светом, другие — синим, третьи — зеленым. Эти кристаллы расположены на экране в строгом порядке. Сигналы поступают от телевизионного передатчика к трем электронно-лучевым пушкам.

На экране цветного телевизора три луча создают одновременно три изображения красного, зеленого и синего цветов. Наложение этих изображений, состоящих из маленьких светящихся точек, воспринимается глазом человека как многоцветное изображение со всеми оттенками цветов. Одновременное свечение кристаллов в одном месте синим, красным и зеленым светом воспринимается глазом как белый цвет; поэтому на экране цветного телевизора можно получать и черно-белые изображения.

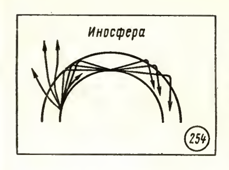
Распространение радиоволн. Радиосвязь осуществляется на длинных (10 000 м — 1000 м), средних (1000 м — 100 м), коротких (100 м — 10 м) и ультракоротких (<10 м) волнах. Радиоволны с различными длинами волн по-разному распространяются у поверхности Земли.

Длинные волны за счет дифракции распространяются далеко за пределы видимого горизонта; радиопередачи на длинных волнах можно принимать на больших расстояниях за пределами прямой видимости антенны.

Средние волны испытывают меньшую дифракцию у поверхности Земли и распространяются за счет дифракции на меньшие расстояния за пределы прямой видимости. Короткие волны еще менее способны к дифракции у поверхности Земли, но их можно принять в любой точке на поверхности Земли. Распространение коротких радиоволн на большие расстояния от передающей радиостанции объясняется их способностью отражаться от ионосферы.

Ионосферой называется верхняя часть атмосферы, начинающаяся с расстояния примерно 50 км от поверхности Земли и пе-





реходящая в межпланетную плазму на расстояниях 70—80 тыс. км. Особенностью ионосферы является высокая концентрация в ней свободных заряженных частиц — ионов и электронов. Ионизация верхних слоев атмосферы создается ультрафиолетовым и рентгеновским излучениями Солнца. Максимальные значения количества свободных электронов в ионосфере — $2 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^6$ электронов в кубическом сантиметре — достигаются на высотах 250—400 км от поверхности Земли.

Проводящий слой земной атмосферы — ионосфера — способен поглощать и отражать электромагнитные волны. От ионосферы хорошо отражаются длинные радиоволны. Это явление наряду с дифракцией увеличивает дальность распространения длинных волн. Хорошо отражаются ионосферой и короткие радиоволны. Многократные отражения коротких радиоволн от ионосферы и земной поверхности делают возможной радиосвязь на коротких волнах между любыми точками на Земле (рис. 254).

Ультракороткие волны (УКВ) не отражаются ионосферой и не огибают поверхность Земли в результате дифракции (рис. 255). Поэтому связь на УКВ осущест-

255



вляется только в пределах прямой видимости антенны передатчика.

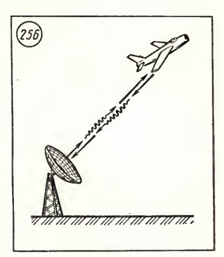
Радиолокация. Большую роль в современном морском флоте, авиации и космонавтике играют радиолокационные средства связи. В основе радиолокации лежит свойство отражения радиоволн от проводящих тел.

Если радиопередатчик включить на очень короткое время и выключить, то можно через некоторое время Δt с помощью радиоприемника зарегистрировать возвращение радиоволн, отраженных от проводящих тел вдали от радиостанции.

Измерив с помощью электронной аппаратуры длительность промежутка времени Δt между моментами времени отправления и возвращения электромагнитных волн, можно определить путь, пройденный радиоволнами: $S = c \cdot \Delta t$, где c — скорость электромагнитной волны. Так как волны прошли путь до тела и обратно, расстояние до тела, отражавшего радиоволны, равно половине этого пути:

$$l = \frac{S}{2} = \frac{c\Delta t}{2}.$$

Чтобы определить не только расстояние до тела, но и его положение в пространстве, необходимо посылать радиоволны узконаправленным пучком. Узкий пучок радиоволн создается с помощью антенны, имеющей форму, близкую к сферической. Для того чтобы антенна радиолокатора могла создать узконаправленный пучок радиоволн, в радиолокации используются ультракороткие волны ($\lambda < 10$ м).



Для определения, например, местонахождения самолета антенну радиолокатора направляют на самолет и на очень короткое время включают генератор электромагнитных волн. Электромагнитные волны отражаются от самолета и возвращаются к радиолокатору. Отраженный радиосигнал улавливает та же антенна, отключенная от передатчика и подключенная к приемнику (рис. 256). По углам поворота антенны радиолокатора определяется направление на самолет. Радиолокатор, установленный на самолете, позволяет по времени прохождения радиоволн до поверхности Земли и обратно измерять высоту, на которой находится самолет.

Вода и суша, сухая и влажная почва, городские строения и транспортные коммуникации по-разному отражают радиоволны. Это позволяет с помощью радиолокационных приборов на самолете не только измерять расстояние до

поверхности Земли, но и получать своеобразную радиолокационную карту местности, над которой летит самолет. Эту карту пилот самолета получает днем и ночью, в ясную погоду и при сплошной облачности, так как облака не являются преградой для электромагнитных волн.

Радиолокационными методами выполнены наиболее точные измерения расстояний от Земли до Луны и до планет Меркурий, Венера, Марс и Юпитер.

75. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Электромагнитное поле обладает энергией. При распространении любых электромагнитных волн происходит перенос энергии от источника волн к приемникам волн.

Отношение энергии E электромагнитного излучения, поглощаемой или излучаемой телом, ко времени t называется *потоком излучения* или *мощностью излучения*. Поток излучения обозначается Φ, измеряется в ваттах:

$$\Phi = E/t. \qquad (75.1)$$

Отношение потока излучения к площади поверхности, на которую падает это излучение, называется *поверхностной плотностью потока излучения*.

Плотность потока излучения обозначается φ, измеряется в ваттах на квадратный метр:

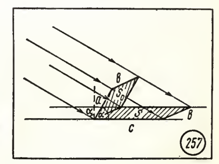
$$\varphi = \frac{\Phi}{S}. \qquad (75.2)$$

Если точечный источник электромагнитного излучения находится в центре сферы радиусом R, то площадь поверхности (площадь сферы) пропорциональна квадрату радиуса сферы. Вся энергия, излучаемая точечным источником, равномерно распределяется по поверхности сферы; в результате плотность потока излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника излучения:

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{4\pi R^2} = \frac{E}{4\pi R^2 t}. \qquad (75.3)$$

Плотность потока излучения зависит от угла падения волн на поверхность тела, так как с увеличением угла падения тот же поток излучения распределяется на все большую поверхность. Как видно из рисунка 257, поток излучения, приходящий при перпендикулярном падении излучения на поверхность $S_0 = ab$, при угле падения α распределяется по поверхности площадью S:

$$S = cb = \frac{ab}{\cos\alpha} = \frac{S_0}{\cos\alpha}.$$



Увеличение площади поверхности в $\frac{1}{\cos\alpha}$ раз приводит к уменьшению плотности потока во столько же раз:

$$\varphi=\frac{\Phi}{S}=\frac{\Phi}{S_0}\cos\alpha=\varphi_0\cos\alpha.$$

При угле падения α плотность потока излучения φ равна произведению плотности потока излучения φ_0 при нормальном падении лучей на косинус угла падения:

$$\varphi=\varphi_0\cos\alpha. \qquad (75.4)$$

76. РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ СВЕТА

Первые научные гипотезы о природе света были высказаны в XVII в. К этому времени были обнаружены два замечательных свойства света — прямолинейность распространения в однородной среде и независимость распространения световых пучков, т. е. отсутствие влияния одного пучка света на распространение другого светового пучка.

И. Ньютон в 1672 г. высказал предположение о корпускулярной природе света. Против корпускулярной теории света выступали современники Ньютона — Р. Гук и Х. Гюйгенс, разработавшие волновую теорию света.

Скорость света. Первым большим успехом в изучении природы света было измерение скорости света.

Самый простой способ измерения скорости света заключается в измерении времени распространения светового сигнала на известное расстояние. Например, можно встать с электрическим фонарем напротив зеркала, в момент включения фонаря запустить секундомер, а в момент времени, соответствующий возвращению света, отраженного зеркалом, остановить секундомер. По измеренному времени t и расстоянию $2l$, пройденному светом, находится скорость c света:

$$c=\frac{2l}{t}.$$

Однако попытки осуществления такого рода опытов оканчивались неудачей, никакого запаздывания света даже при расстоянии до зеркала в несколько километров обнаружить не удавалось.

Впервые экспериментально скорость света была определена астрономическим методом. Датский ученый Олаф Ремер (1644—1710) в 1676 г. обнаружил, что при изменении расстояния между Землей и планетой Юпитер вследствие их обращения вокруг Солнца происходит изменение периодичности появления спутника Юпитера Ио из его тени (рис. 258). В том случае, когда Земля находится по другую сторону от Солнца по отношению к Юпитеру, спутник Ио появляется из-за Юпитера на 22 мин позже, чем это должно произойти по расчетам. Но спутники обращаются вокруг планет равномерно,— следовательно, это запаздывание кажущееся. Ремер догадался, что причиной кажущегося запазды-



Орбита спутника Юпитера

Земля

Орбита Юпитера

Орбита Земли

258

вания появления спутника Юпитера при увеличении расстояния между Землей и Юпитером является конечность скорости распространения света. При перемещении Земли на противоположную сторону ее орбиты расстояние между Землей и Юпитером увеличивалось на диаметр земной орбиты, т. е. на 300 млн. км. Разделив это расстояние на кажущееся время запаздывания, Ремер нашел, что скорость света превышает 200 000 км/с.

Более точные измерения показывают, что скорость света равна 299 792 км/с или примерно 300 000 км/с.

Электромагнитная природа света. Одним из наиболее трудных для волновой теории света был вопрос о том, что же колеблется при распространении световых волн, в какой среде они распространяются.

На вопрос о природе света и механизме его распространения давала ответ гипотеза Максвелла. На основании совпадения экспериментально измеренного значения скорости света в вакууме со значением скорости распространения электромагнитных волн Максвелл высказал предположение, что свет — электромагнитные волны. Эта гипотеза подтверждается многими экспериментальными фактами. Представлениям электромагнитной теории света полностью соответствуют экспериментально открытые законы отражения и

преломления света, явления интерференции, дифракции и поляризация света.

Корпускулярно-волновой дуализм. Законы фотоэффекта, явления взаимодействия света с веществом электромагнитная теория света объяснить не может. В XX в. в физике утвердились представления о корпускулярно-волновом дуализме свойств света.

Тот факт, что свет в одних опытах обнаруживает волновые свойства, а в других — корпускулярные, означает, что природа света более сложна, чем природа привычных нам тел окружающего мира. Свет не является совокупностью частиц, подобных маленьким дробинкам, нельзя его представлять себе и подобным звуковым волнам или волнам на поверхности воды.

В любых световых явлениях при глубоком их изучении обнаруживается неразрывная связь корпускулярных и волновых свойств света.

77. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

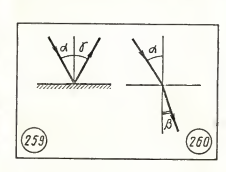
Отражение света. Наблюдения показывают, что в однородной среде свет распространяется прямолинейно. Прямая, указывающая направление распространения света, называется *световым лучом.*

На границе раздела двух сред свет может частично отразиться и распространяться в первой среде по новому направлению, а также частично пройти через границу раздела и распространиться во второй среде.

В большей или меньшей мере отражение света происходит от любых предметов, поэтому мы видим все освещенные тела.

Закон отражения. Как показывают наблюдения, при отражении света всегда выполняется *закон отражения:* **луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восставленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости; угол отражения γ равен углу падения α** (рис. 259).

Этот закон совпадает с законом отражения для волн любой природы и может быть получен как следствие принципа Гюйгенса. Может показаться, что закон отражения может быть успешно объяснен и корпускулярной теорией света. Действительно, при ударе о пол упругого мяча угол отражения также равен углу падения, поэтому свет можно представить себе как поток частиц, испытывающих упругие столкновения с поверхностью раздела двух сред. Но эта гипотеза не может объяснить, почему свет





почти не испытывает отражения от поверхности твердого стекла или даже алмаза, но полностью отражается тончайшей пленкой серебра или жидкой ртутью. Электромагнитная теория света объясняет эти факты. Стекло и алмаз — диэлектрики, а диэлектрики прозрачны для электромагнитных волн. Тонкий слой серебра или другого металла, нанесенный на лист стекла, делает этот лист непрозрачным для электромагнитных волн. Падающая электромагнитная волна возбуждает в проводящем слое вынужденные колебания свободных электронов с частотой, равной частоте колебаний вектора напряженности электрического поля в электромагнитной волне. Эти колебания электронов и порождают отраженную электромагнитную волну. Таким образом объясняется способность зеркала отражать падающий на него свет.

Преломление света. Волновая теория света объяснила и явление преломления света. Наблюдения показывают, что при переходе света из одной среды в другую может происходить изменение направления распространения света — *преломление света*.

В XVII в. был экспериментально установлен *закон преломления света:* **падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред.**

Обозначим угол падения α, угол преломления β (рис. 260), тогда закон преломления света получит выражение

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=n, \qquad (77.1)$$

где n — постоянная величина для двух данных сред, называемая *относительным показателем преломления* второй среды относительно первой.

Экспериментально установленный закон преломления света получает объяснение на основании принципа Гюйгенса. Согласно волновым представлениям преломление является следствием изменения скорости распространения волн при переходе из одной среды в другую, а физический смысл показателя преломления — это отношение скорости распространения волн в первой среде v_1 к скорости их распространения во второй среде v_2:

$$n=\frac{v_1}{v_2}. \qquad (77.2)$$

Показатель преломления n среды относительно вакуума называется *абсолютным показателем преломления* этой среды:

$$n=\frac{c}{v}, \qquad (77.3)$$

где c — скорость света в вакууме, v — скорость света в данной среде. Абсолютные показатели преломления всех веществ больше единицы. Это значит, что скорость распространения света в любом веществе меньше скорости распространения света в вакууме.

Для двух сред с абсолютными показателями преломления n_1

и n_2 относительный показатель преломления n равен отношению абсолютного показателя преломления второй среды к абсолютному показателю преломления первой среды. Действительно, так как

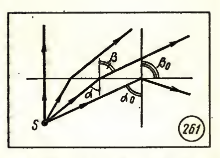
$$n_1=\frac{c}{v_1},\ n_2=\frac{c}{v_2}\ \text{и}\ n=\frac{v_1}{v_2},$$

$$\text{то}\ n=\frac{n_2}{n_1}. \qquad (77.4)$$

Из двух сред та среда, которая обладает меньшим значением абсолютного показателя преломления, называется оптически менее плотной средой. Если свет переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную, то угол преломления β меньше угла падения α.

При переходе из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду угол преломления β оказывается больше угла падения α (рис. 261).

Полное отражение. При наблюдении явления преломления света можно заметить, что наряду с преломлением происходит и отражение света от границы раздела двух сред; при увеличении угла падения интенсивность отраженного луча увеличивается. В случае перехода света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, например из стекла в воздух, при постепенном увеличении угла падения можно достигнуть такого его значения α_0, при котором угол преломления должен стать равным $\beta_0=90°$ (см. рис. 261). При этом выполняется равенство



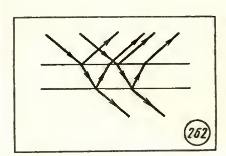
$$\alpha_0=\arcsin\frac{1}{n}.$$

Опыт показывает, что при достижении такого значения угла падения интенсивность преломленного луча становится равной нулю: свет, падающий на границу раздела двух сред, полностью отражается от нее.

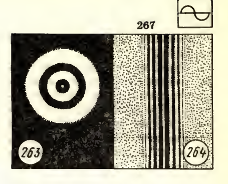
Угол падения α_0, при котором наступает полное отражение света, называется *предельным углом полного отражения.* При всех углах падения, бо́льших и равных α_0, происходит полное отражение света.

78. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

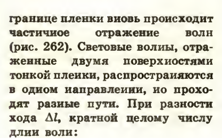
Интерференция света. Наиболее наглядно волновые свойства света обнаруживаются в явлениях интерференции и дифракции. *Интерференцией света* объясняется окраска мыльных пузырей и тонких масляных пленок на воде, хотя мыльный раствор и масло бесцветные. Световые волны частично отражаются от поверхности тонкой пленки, частично проходят в нее. На второй



262



263 264



границе пленки вновь происходит частичное отражение волн (рис. 262). Световые волны, отраженные двумя поверхностями тонкой пленки, распространяются в одном направлении, но проходят разные пути. При разности хода Δl, кратной целому числу длин волн:

$$\Delta l = 2k\frac{\lambda}{2}, \qquad (78.1)$$

наблюдается интерференционный максимум.

При разности Δl, кратной нечетному числу полуволн:

$$\Delta l = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, \qquad (78.2)$$

наблюдается интерференционный минимум. Когда выполняется условие максимума для одной длины световой волны, то оно не выполняется для других длин волн. Поэтому освещаемая белым светом тонкая бесцветная прозрачная пленка кажется окрашенной. При изменении толщины пленки или угла падения световых волн разность хода изменяется и условие максимума выполняется для света с другой длиной волны.

Явление интерференции в тонких пленках применяется для контроля качества обработки поверхностей, просветления оптики.

Дифракция света. При прохождении света через малое круглое отверстие на экране вокруг центрального светлого пятна наблюдаются чередующиеся темные и светлые кольца (рис. 263). Если свет проходит через узкую щель, то получается картина, представленная на рисунке 264.

Явление отклонения света от прямолинейного направления распространения при прохождении у края преграды называется *дифракцией света*.

Появление чередующихся светлых и темных колец или полос в области геометрической тени французский физик Френель объяснил тем, что световые волны, приходящие в результате дифракции из разных точек отверстия в одну точку на экране, интерферируют между собой.

Дифракционная решетка. Дифракция света используется в спектральных приборах. Одним из основных элементов во многих спектральных приборах является *дифракционная решетка*. Обычно применяются отражательные решетки, но мы рассмотрим принцип действия решетки, представляющей собой прозрачную пластинку с нанесенной на нее системой параллельных непрозрачных полос, расположенных на

одинаковых расстояниях d друг от друга.

Пусть на решетку падает монохроматическая волна с плоским волновым фронтом. В результате дифракции из каждой щели свет распространяется не только в первоначальном направлении, но и по всем другим направлениям.

Если за решеткой поставить собирающую линзу, то на экране в фокальной плоскости параллельные лучи от всех щелей соберутся в одну полоску (рис. 265). Параллельные лучи, идущие от краев двух соседних щелей, имеют разность хода:

$$\Delta l = d \sin \varphi, \qquad (78.3)$$

где d — расстояние между соответствующими краями соседних щелей, называемое *периодом решетки;* φ — угол отклонения световых лучей от перпендикуляра к плоскости решетки. При равенстве разности хода Δl целому числу длин волн

$$d \sin \varphi = k\lambda \qquad (78.4)$$

265

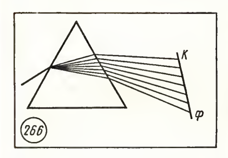
(λ — длина волны падающего света) наблюдается интерференционный максимум света. Линза не вносит разности хода. Как следует из уравнения (78.4), условие интерференционного максимума для каждой длины световой волны выполняется при своем значении угла дифракции φ. В результате при прохождении через дифракционную решетку пучок белого света разлагается в спектр.

Угол дифракции имеет наибольшее значение для красного света, так как длина волны красного света больше всех остальных в области видимого света. Наименьшее значение угол дифракции φ имеет для фиолетового света.

Поляризация света. Опыт показывает, что интенсивность светового пучка, проходящего через некоторые прозрачные кристаллы, например исландского шпата, зависит от взаимной ориентации двух кристаллов. При одинаковой ориентации кристаллов свет проходит через второй кристалл без ослабления. Если же второй кристалл повернут на 90° от первоначального положения, то свет через него не проходит.

Это явление получает объяснение, если принять, что свет представляет собой поперечные волны. При прохождении через первый кристалл происходит *поляризация света,* т. е. кристалл пропускает только такие волны, в которых колебания вектора $\vec{E}$ напряженности электрического поля совершаются в одной плоскости. Эта плоскость называется *плоскостью поляризации.* Если плоскость, в которой пропускаются колебания вторым кристаллом,



совпадает с плоскостью поляризации, поляризованный свет проходит через второй кристалл без ослабления. При повороте кристалла на 90° поляризованный свет не проходит через кристалл.

Явление поляризации света доказывает волновую природу света и поперечность световых волн.

Дисперсия света. Сплошной спектр. Узкий параллельный пучок белого света при прохождении через стеклянную призму разлагается на пучки света разного цвета (рис. 266). Цветную полоску на экране называют *сплошным спектром*. Явление зависимости скорости света от длины волны (или частоты) называется *дисперсией* света. Сплошной спектр наблюдается при разложении света, излучаемого нагретыми твердыми и жидкими телами. Дисперсия света была открыта И. Ньютоном.

Объясняется разложение белого света тем, что белый свет состоит из электромагнитных волн с разной длиной волны и показатель преломления света зависит от его длины волны. Наибольшее значение он имеет для света с самой короткой длиной волны — фиолетового света. Наименьшим показателем преломления обладает самый длинноволновый свет — красный. Абсолютный показатель преломления света определяется отношением скорости света c в вакууме к скорости света v в среде:

$$n=\frac{c}{v}.$$

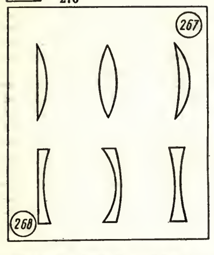
Опыты показали, что в вакууме скорость света одинакова для света с любой длиной волны. Отсюда следует, что разложение света в стеклянной призме обусловлено зависимостью скорости распространения света в среде от длины световой волны.

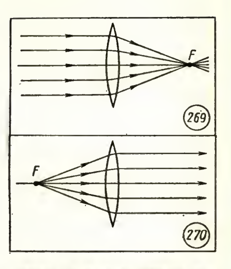
79. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Ход лучей в линзах. *Линзой* называется прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Линзы обычно изготавливаются из стекла.

Тонкой называется линза, толщина которой значительно меньше радиусов ограничивающих ее сферических поверхностей. Линза, которая в середине толще, чем у краев, называется *выпуклой линзой* (рис. 267). Линза, которая у краев толще, чем в середине, называется *вогнутой линзой* (рис. 268). Прямая, проходящая через центры O_1 и O_2 сферических поверхностей линзы, называется *главной оптической осью* линзы.

Если толщина линзы пренебрежимо мала, то можно считать, что главная оптическая ось пере-



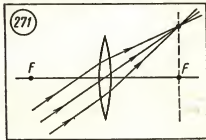


секается с линзой в одной точке. Точка *O* пересечения главной оптической оси с тонкой линзой называется *оптическим центром* линзы.

Опыт показывает, что луч света, идущий вдоль главной оптической оси, проходит через линзу без изменения направления распространения. В воздухе или в вакууме все лучи, параллельные главной оптической оси выпуклой линзы, после прохождения линзы отклоняются к оси и проходят через одну точку *F* на главной оптической оси (рис. 269). Поэтому выпуклые линзы называют *собирающими* линзами. Точка *F* называется *главным фокусом* линзы. Плоскость, проходящая через главный фокус линзы перпендикулярно главной оптической оси, называется *фокальной плоскостью.*

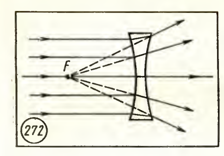
У линзы два главных фокуса в однородной среде расположены на одинаковых расстояниях от ее оптического центра. Расстояние от оптического центра линзы до главного фокуса называется *фокусным расстоянием F* линзы. Все лучи, проходящие через один из ее главных фокусов, выходят из линзы параллельно главной оптической оси (рис. 270). Любая прямая, проходящая через оптический центр линзы и не совпадающая с главной оптической осью, называется *побочной оптической осью.* Световые лучи, параллельные побочной оптической оси собирающей линзы, проходят через точку пересечения побочной оптической оси с фокальной плоскостью (рис. 271).

В воздухе или в вакууме все лучи, параллельные главной оптической оси вогнутой линзы,









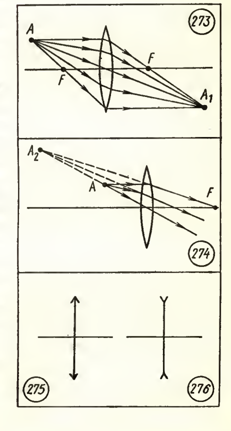
отклоняются от оптической оси, поэтому вогнутые линзы называются *рассеивающими* линзами. Продолжения лучей в противоположную сторону сходятся в одной точке F на главной оптической оси перед линзой (рис. 272). Эта точка называется главным фокусом рассеивающей линзы. Главный фокус рассеивающей линзы мнимый, так как в действительности лучи света в нем не собираются.

Построение изображений в тонких линзах. Основное свойство линз, используемое в оптических приборах, заключается в том, что все лучи, исходящие из одной точки A перед линзой, собираются в другой точке A_1 за линзой (рис. 273) или кажутся исходящими из одной точки A_2 перед линзой (рис. 274). В первом случае изображение точки A называется *действительным*, во втором — *мнимым*.

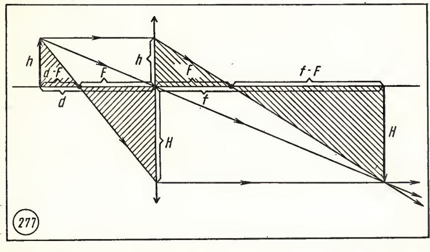
Замечательным свойством световых лучей является свойство обратимости: луч, направленный противоположно лучу, выходящему из любой оптической системы, пройдет через нее в обратном направлении точно по тому же пути, по какому прошел ее в прямом направлении первый луч.

Используя свойства лучей, проходящих через оптический центр линзы или через ее фокусы, а также лучей, параллельных главной оптической оси или одной из ее побочных осей, можно построить изображение любого предмета, получаемое с помощью собирающей или рассеивающей линзы. Условное изображение собирающей линзы представлено на рисунке 275, рассеивающей — на рисунке 276.

Формула линзы. Расстояние f от собирающей линзы до изображения связано с расстоянием d от предмета до линзы и фо-







кусным расстоянием F линзы. Выразим эту зависимость математически. Ход лучей представлен на рисунке 277. Из подобия треугольников (заштрихованы одинаково) следует

$$\frac{h}{H}=\frac{d-F}{F} \text{ и } \frac{h}{H}=\frac{F}{f-F}.$$

Из этих двух уравнений будем иметь

$$\frac{d-F}{F}=\frac{F}{f-F} \text{ и } df=dF+Ff.$$

Делением на произведение dfF получаем

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{f}+\frac{1}{d}. \qquad (79.1)$$

Это уравнение называется *формулой линзы.*

Формула линзы применима для нахождения расстояния до изображения при любом расположении предмета относительно линзы.

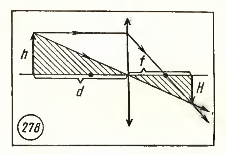
Если значение расстояния f получается при расчете отрицательным, то это значит, что изображение предмета мнимое и находится по ту же сторону от линзы, что и предмет. Для рассеивающей линзы значение фокусного расстояния в расчетах нужно брать со знаком «минус» и, так как изображение предмета получаем мнимым, расстояние f до изображения всегда должно быть со знаком «минус».

Оптическая сила линзы. Величина, обратная фокусному расстоянию F, называется оптической силой линзы D:

$$D=\frac{1}{F}. \qquad (79.2)$$

Оптическая сила выражается в *диоптриях* (дптр). Линза с фокусным расстоянием 1 м обладает оптической силой в 1 дптр. Оптическая сила собирающей линзы положительна, оптическая сила рассеивающей линзы отрицательна.

Линейное увеличение. В зависимости от положения предмета относительно линзы линейные размеры изображения изменяют-



ся. Отношение линейных размеров H изображения к линейным размерам h предмета называется *линейным увеличением* Γ:

$$\Gamma=\frac{H}{h}. \qquad (79.3)$$

Из подобия треугольников, заштрихованных на рисунке 278, следует

$$\frac{H}{h}=\frac{f}{d}$$

или

$$\Gamma=\frac{f}{d}. \qquad (79.4)$$

Из формул (79.1) и (79.4) или построением хода лучей можно установить, что для собирающей линзы при условии $d>2F$ действительное изображение получается уменьшенным ($\Gamma<1$). В случае $d=2F$ линейные размеры действительного изображения равны размерам предмета ($\Gamma=1$). В случае $F<d<2F$ изображение действительное, увеличенное ($\Gamma>1$).

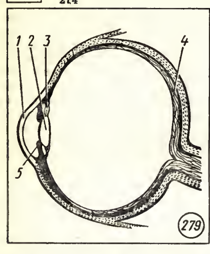
При помещении предмета между фокусом и центром линзы ($d<F$) изображение получается увеличенное, мнимое.

Фотоаппарат. При расположении предмета на расстоянии, большем двойного фокусного расстояния, линза дает его действительное уменьшенное изображение. Это свойство линзы используется в фотоаппаратах. Основными частями фотоаппарата являются объектив, обычно состоящий из нескольких линз, светонепроницаемый корпус, видоискатель, диафрагма и затвор. В светонепроницаемый корпус фотоаппарата помещают фотопленку, чувствительную к действию света. На фотопленке объектив фотоаппарата создает действительное уменьшенное изображение фотографируемого предмета. Для получения четкого изображения предмета, который может быть расположен на разных расстояниях от фотоаппарата, объектив перемещают относительно фотопленки, результат наводки на резкость обычно контролируется через видоискатель.

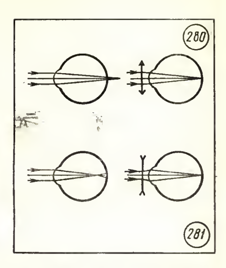
В зависимости от условий освещенности и чувствительности фотопленки путь свету от объектива к фотопленке открывается с помощью затвора на заданный интервал времени, обычно на сотые доли секунды. Световой поток регулируется и кольцевым отверстием в диафрагме за объективом, диаметр отверстия можно плавно изменять.

Глаз как оптическая система. Оптическая система глаза человека подобна оптической системе фотоаппарата.

При построении изображения предметов на сетчатке *4* глаза (рис. 279) основную роль играет преломление света на сферической поверхности границы раздела системы «роговица — воздух» *1*, дополнительное преломление осуществляется хрусталиком *2*, находящимся за радужной оболоч-



279


280
281

кой 5. Хрусталик имеет форму двояковыпуклой линзы. Радиус кривизны хрусталика изменяется под действием специальной мышцы 3. Этот процесс называется аккомодацией. Путем аккомодации изменяется фокусное расстояние оптической системы глаза и получается четкое изображение предмета на сетчатке.

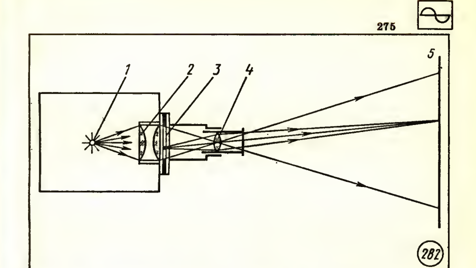
Очки. Если оптическая система глаза дает изображение далеких предметов за сетчаткой, то человек страдает *дальнозоркостью*. Для исправления этого дефекта применяются очки с собирающими линзами (рис. 280).

При *близорукости* глаза изображение получается перед сетчаткой. Для исправления этого дефекта применяются очки с рассеивающими линзами (рис. 281).

Проекционный аппарат. Для получения увеличенных изображений предметов применяются проекционные аппараты. Диапроекторы используют для получения неподвижных изображений, с помощью кинопроекторов получают быстро сменяющиеся кадры изображения, воспринимаемые глазом человека как движущиеся изображения.

В проекционном аппарате (рис. 282) рисунок или фотоснимок предмета на прозрачной пленке или стекле помещают от объектива на расстоянии d, удовлетворяющем условию: $F<d<2F$. Для освещения пленки используют электрическую лампу или электрическую дугу 1 (в стационарном киноаппарате). Для концентрации светового потока от источника света на пленку применяется конденсор 2. Конденсор представляет собой систему из линз, собирающих расходящийся от источника света световой поток на кадре пленки 3. Изображение ярко освещенной пленки создается на экране 5 с помощью объектива 4 диапроектора или кинопроектора.

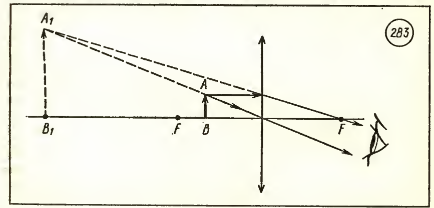
Лупа. Линзы с фокусными расстояниями менее примерно 10 см применяются для получения увеличенных изображений

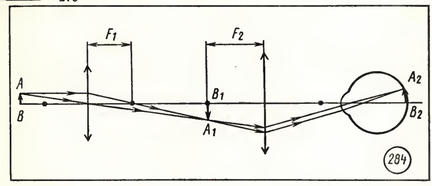


небольших предметов. Для этого предмет помещают перед линзой на расстоянии, немного меньшем фокусного. При этом лучи, исходящие из одной точки предмета, не собираются в одну точку за линзой, а выходят из нее расходящимся пучком (рис. 283). Расходящийся пучок света при попадании в глаз человека воспринимается исходящим из одной точки, в которой пересекаются продолжения лучей. Эта точка A_1 является мнимым изображением точки A, а стрелка A_1B_1 — мнимым изображением стрелки AB.

Короткофокусная линза, используемая для получения увеличенных мнимых изображений предметов, называется *лупой*.

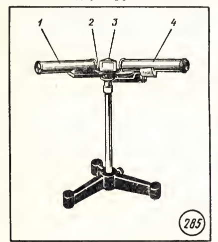
Микроскоп. Для получения больших увеличений применяются *микроскопы*. Увеличенное изображение мелких предметов в микроскопе получается с помощью оптической системы, состоящей из объектива и окуляра. Самый простой микроскоп — это





система из двух линз. Предмет помещается перед линзой, служащей объективом, на расстоянии d, удовлетворяющем условию $F_1 < d < 2F_1$, и рассматривается через окуляр, используемый в качестве лупы (рис. 284). Увеличение Γ, получаемое с помощью микроскопа, равно произведению увеличения объектива Γ_1 на увеличение окуляра Γ_2.

Спектроскоп. Прибор для разложения сложного света и наблюдения спектров называется *спектроскопом*. Спектроскоп (рис. 285) состоит из двух труб — коллиматорной *1* и зрительной *4*, укрепленных на подставке *2*, и стеклянной призмы *3* под крышкой. На одном конце коллиматорной трубы имеется щель для выделения узкого пучка света, на другом ее конце — линза для превращения расходящегося пучка света в параллельный пучок. Параллельный пучок света, выходящий из коллиматора, попадает на грань стеклянной призмы. Показатель преломления света зависит от его длины волны; поэтому пучок света, состоящий из волн с разной длиной волны, разлагается на параллельные пучки света разного цвета, идущие по разным направлениям. Линза зрительной трубы фокусирует каждый из параллельных пучков и дает, таким образом, изображение щели (рис. 286). Разноцветные изображения щели образуют разноцветную полосу — спектр.



Спектр можно наблюдать через окуляр, используемый в качестве лупы. Если нужно получить фотографию спектра, то фотопленку или фотопластинку помещают в том месте, где получается действительное изображение спектра. Прибор для фотографи-



рования спектров называется *спектрографом.*

Линейчатые спектры излучения. Наблюдения спектров света, испускаемого нагретыми разреженными атомарными газами, показали, что спектр нагретого вещества в газообразном состоянии состоит из узких линий разного цвета. Такой спектр называется *линейчатым спектром излучения.* Для получения линейчатого спектра излучения исследуемое вещество нужно нагреть до высокой температуры, достаточной для перевода вещества в газообразное состояние и возбуждения атомов. Обычно для этой цели используют дуговой или искровой разряд.

Линейчатый спектр излучения у каждого химического элемента свой, не совпадающий со спектром ни одного другого химического элемента.

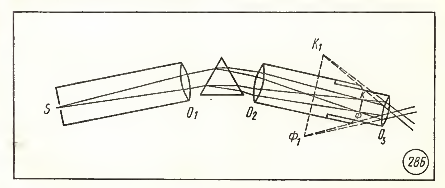
Линейчатые спектры поглощения. Если пучок белого света проходит через вещество в газообразном состоянии, то при разложении пучка света в спектроскопе на сплошном спектре излучения обнаруживаются темные линии. Эти линии называются *линейчатым спектром поглощения.* Линии спектра поглощения расположены в тех местах спектра, в которых находятся линии спектра излучения данного химического элемента, когда вещество излучает свет.

Спектральный анализ. Исследование линейчатого спектра вещества позволяет определить, из каких химических элементов оно состоит и в каком количестве содержится каждый элемент в данном веществе.

Количественное содержание элемента в исследуемом образце определяется путем сравнения интенсивности отдельных линий спектра этого элемента с интенсивностью линий другого химического элемента, количественное содержание которого в образце известно.

Метод определения качественного и количественного состава вещества по его спектру называется *спектральным анализом.*

Спектральный анализ широко применяется при поисках полезных ископаемых для определения химического состава образцов руды. В промышленности спектральный анализ позволяет контролировать составы сплавов и примесей, вводимых в металлы



для получения материалов с заданными свойствами.

Достоинствами спектрального анализа являются высокая чувствительность и быстрота получения результатов. С помощью спектрального анализа можно обнаружить в пробе массой $6 \cdot 10^{-7}$ г присутствие золота при его массе всего 10^{-8} г. Определение марки стали методом спектрального анализа может быть выполнено за несколько десятков секунд.

Спектральный анализ позволяет определять химический состав небесных тел, удаленных от Земли на расстояния в миллиарды световых лет. Химический состав атмосфер планет и звезд, холодного газа в межзвездном пространстве определяется по спектрам поглощения.

Изучая спектры, ученые смогли определить не только химический состав небесных тел, но и их температуру. По смещению спектральных линий можно определять скорость движения небесного тела.

80. СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Свойства электромагнитных излучений. Электромагнитные излучения с различными длинами волн имеют довольно много различий, но все они, от радиоволн и до гамма-излучения, одной физической природы. Все виды электромагнитного излучения в большей или меньшей степени проявляют свойства интерференции, дифракции и поляризации, характерные для волн. Вместе с тем все виды электромагнитного излучения в большей или меньшей мере обнаруживают квантовые свойства.

Общим для всех электромагнитных излучений являются механизмы их возникновения: электромагнитные волны с любой длиной волны могут возникать при ускоренном движении электрических зарядов или при переходах молекул, атомов или атомных ядер из одного квантового состояния в другое. Гармонические колебания электрических зарядов сопровождаются электромагнитным излучением, имеющим частоту, равную частоте колебаний зарядов.

Радиоволны. При колебаниях, происходящих с частотами от 10^5 до 10^{12} Гц, возникают электромагнитные излучения, длины волн которых лежат в интервале от нескольких километров до нескольких миллиметров. Этот участок шкалы электромагнитных излучений относится к диапазону радиоволн. Радиоволны применяются для радиосвязи, телевидения, радиолокации.

Инфракрасное излучение. Электромагнитные излучения с длиной волны, меньшей 1—2 мм, но большей $8 \cdot 10^{-7}$ м, т. е. лежащие между диапазоном радиоволн и диапазоном видимого света, называются *инфракрасным излучением.*

Область спектра за красным его краем впервые экспериментально была исследована в 1800 г.

английским астрономом **В и л ь я м о м Г е р ш е л е м** (1738—1822). Гершель поместил термометр с зачерненным шариком за красный край спектра и обнаружил повышение температуры. Шарик термометра нагревался излучением, невидимым глазом. Это излучение назвали *инфракрасными лучами*.

Инфракрасное излучение испускают любые нагретые тела. Источниками инфракрасного излучения служат печи, батареи водяного отопления, электрические лампы накаливания.

С помощью специальных приборов инфракрасное излучение можно преобразовать в видимый свет и получать изображения нагретых предметов в полной темноте. Инфракрасное излучение применяется для сушки окрашенных изделий, стен зданий, древесины.

Видимый свет. К видимому свету (или просто свету) относятся излучения с длиной волны примерно от $8 \cdot 10^{-7}$ до $4 \cdot 10^{-7}$ м, от красного до фиолетового света.

Значение этого участка спектра электромагнитных излучений в жизни человека исключительно велико, так как почти все сведения об окружающем мире человек получает с помощью зрения.

Свет является обязательным условием для развития зеленых растений и, следовательно, необходимым условием для существования жизни на Земле.

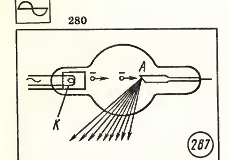
Ультрафиолетовое излучение. В 1801 г. немецкий физик **И о г а н н Р и т т е р** (1776—1810), исследуя спектр, открыл, что за его фиолетовым краем имеется область, создаваемая невидимыми глазом лучами. Эти лучи воздействуют на некоторые химические соединения. Под действием этих невидимых лучей происходит разложение хлорида серебра, свечение кристаллов сульфида цинка и некоторых других кристаллов.

Невидимое глазом электромагнитное излучение с длиной волны меньше, чем у фиолетового света, называют *ультрафиолетовым излучением*. К ультрафиолетовому излучению относят электромагнитные излучения в диапазоне длин волн от $4 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ м.

Ультрафиолетовое излучение способно убивать болезнетворных бактерий, поэтому его широко применяют в медицине. Ультрафиолетовое излучение в составе солнечного света вызывает биологические процессы, приводящие к потемнению кожи человека — загару.

В качестве источников ультрафиолетового излучения в медицине используются газоразрядные лампы. Трубки таких ламп изготавливают из кварца, прозрачного для ультрафиолетовых лучей; поэтому эти лампы называют кварцевыми лампами.

Рентгеновские лучи. Если в вакуумной трубке между нагретым катодом, испускающим электроны, и анодом приложить постоянное напряжение в несколько десятков тысяч вольт, то электроны будут сначала разгоняться электрическим полем, а затем резко тормозиться в веществе анода при взаимодействии с его атомами. При торможении быстрых электронов в веществе



или при переходах электронов на внутренних оболочках атомов (рис. 287) возникают электромагнитные волны с длиной волны меньше, чем у ультрафиолетового излучения. Это излучение было открыто в 1895 г. немецким физиком Вильгельмом Рентгеном (1845—1923). Электромагнитные излучения в диапазоне длин волн от 10^{-14} до 10^{-7} м называются *ретгеновскими лучами*.

Рентгеновские лучи невидимы глазом. Они проходят без существенного поглощения через значительные слои вещества, непрозрачного для видимого света. Обнаруживают рентгеновские лучи по их способности вызывать определенное свечение некоторых кристаллов и действовать на фотопленку.

Способность рентгеновских лучей проникать через толстые слои вещества используется для диагностики заболеваний внутренних органов человека. В технике рентгеновские лучи применяются для контроля внутренней структуры различных изделий, сварных швов. Рентгеновское излучение обладает сильным биологическим действием и применяется для лечения некоторых заболеваний.

Гамма-излучение. *Гамма-излучением* называют электромагнитное излучение, испускаемое возбужденными атомными ядрами и возникающее при взаимодействии элементарных частиц.

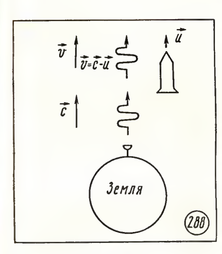
Гамма-излучение — самое коротковолновое электромагнитное излучение ($\lambda \leqslant 10^{-10}$ м). Его особенностью являются ярко выраженные корпускулярные свойства. Поэтому гамма-излучение обычно рассматривают как поток частиц — гамма-квантов. В области длин волн от 10^{-10} до 10^{-14} м диапазоны рентгеновского и гамма-излучений перекрываются, в этой области рентгеновские и гамма-кванты по своей природе тождественны и отличаются лишь происхождением.

81. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Принцип относительности Эйнштейна. Еще во времена Галилея было установлено, что в любых инерциальных системах отсчета все механические явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях. Это утверждение называется принципом относительности Галилея. Но справедлив ли принцип относительности и для электромагнитных явлений? Ответ на этот вопрос совсем не очевиден.

Рассмотрим такой пример. Пусть от Земли со скоростью $\vec{u}$ в космическом пространстве движется космический корабль. С какой скоростью относительно кос-





монавтов будет распространяться свет от источника, находящегося на Земле? Скорость света в системе отсчета «Земля» равна c, тогда как в системе отсчета «корабль», удаляющейся от Землн со скоростью $\vec{u}$, скорость света по классическому закону сложения скоростей должна быть равна $v = c - u$ (рис. 288).

Получается, что скорость распространения света в вакууме зависит от выбора системы отсчета. Это значит, что такое явление, как распространение света в вакууме, происходит неодинаково в разных инерциальных системах отсчета, т. е. принцип относнтельности неприменим для электродинамических явлений.

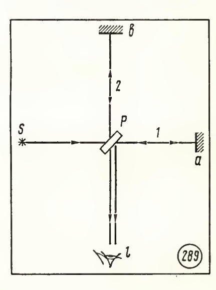
Для ответа на вопрос, зависит лн в действительности скорость света от выбора инерцнальной системы отсчета, необходимо было пронзвести соответствующие опыты. Трудность постановки такнх опытов связана с тем, что скорость света очень велика —300 000 км/с — в вакууме. Для обнаружения эффектов, связанных с двнжением системы отсчета, ее скорость должна быть достаточно большой.

Близкой к инерциальной можно считать снстему отсчета, связанную с центром Земли. При движении вокруг Солнца Земля пролетает за 1 секунду 30 километров и при этом из-за большого радиуса орбиты ее траектория отклоняется от прямолинейной всего на 3 миллиметра.

Несмотря на то что скорость движения Земли в 30 раз больше скорости пули, никакие механические опыты не позволяют обнаружить это движение.

После установления электромагнитной прнроды света ученые предпрннялн попыткн обнаружить факт двнжения Земли в опытах со световымн волнами.

Американский физик Альберт Майкельсон в 1881 г. выполнил следующнй опыт. Луч света от нсточника (рнс. 289) распростра-



нялся по направлению движения Земли и проходил через полупрозрачную пластину *p*, расположенную под углом 45° к направлению распространения луча. Пластина разделяла один луч на два.

Первый луч распространялся по направлению движения Земли, отражался зеркалом *a*, возвращался к пластине *p* и от нее — к наблюдателю.

Второй луч распространялся в направлении, которое перпендикулярно вектору скорости Земли, отражался от зеркала *b* и от него — к наблюдателю.

Если бы скорость света зависела от скорости движения системы отсчета, то из-за движения прибора вместе с Землей при одинаковой длине отрезков *pa* и *pb* время распространения света от пластины *p* до зеркал *a* и *b* и обратно было бы различным. Предполагаемое различие было бы обусловлено тем, что в первом случае векторы скорости света и скорости Земли направлены вдоль одной прямой, а во втором угол между векторами скорости равен 90°.

Различие в скоростях распространения света при одинаковых значениях пройденных путей должно приводить к тому, что в лучах *1* и *2*, приходящих в точку наблюдения *e*, колебания не будут совпадать по фазе. Разность хода лучей можно определить по наблюдению интерференции световых волн, соответствующих лучам *1* и *2*.

Прибор, в котором наблюдается такая интерференционная картина, называется интерферометром Майкельсона.

Изготовление интерферометра с совершенно одинаковыми расстояниями от пластины *p* до зеркал *a* и *b* является технически неосуществимой задачей, но это не является препятствием для осуществления опыта Майкельсона.

Пусть расстояния *pa* и *pb* несколько отличаются друг от друга и интерференционная картина обусловлена не только сложением скоростей, но и различием этих расстояний.

Проведем второй опыт. Ничего не изменяя во взаимном расположении деталей, интерферометр поворачиваем на 90° вокруг вертикальной оси таким образом, чтобы теперь плечо *pb* было расположено по вектору скорости Земли, а плечо *pa* — перпендикулярно этому вектору. Разность хода лучей из-за неодинаковости плеч *pb* и *pa* при этом не изменяется, а разность хода, вызываемая сложением скоростей, должна изменить свой знак на противоположный; поэтому наблюдаемая картина интерференции при повороте прибора должна была бы измениться.

Опыты Майкельсона и затем ряда других исследователей показали, что никакого изменения интерференционной картины при повороте интерферометра не происходит.

Отсюда следовало сделать вывод, что скорость света в вакууме постоянна и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.

Два опытных факта — постоянство скорости света и независимость законов физики от выбора инерциальной системы от-

счета — казались несовместимыми, так как факт постоянства скорости света в разных системах отсчета прямо противоречил классическому закону сложения скоростей.

Выход из сложившегося в физике положения, при котором опытные факты не могли получить последовательного теоретического описания, был найден Альбертом Эйнштейном в 1905 г.

В основу своей теории, названной частной теорией относительности, Эйнштейн положил два постулата, являющихся обобщением опытных фактов:

1. Принцип относительности — любые физические процессы протекают одинаково в различных инерциальных системах отсчета (при одинаковых начальных условиях).

2. Принцип постоянства скорости света — скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника и наблюдателя.

Принцип относительности, распространенный на все физические явления, называется принципом относительности Эйнштейна.

Принятие двух постулатов привело к необходимости коренных изменений в представлениях о свойствах пространства и времени, принятых в физике, до создания теории относительности — классической физики. Явления, описываемые теорией относительности, но не объяснимые с позиций классической физики, называются релятивистскими (от лат. relativus — относительный) явлениями или эффектами.

Релятивистский закон сложения скоростей. Постулат о независимости скорости света от выбора системы отсчета находится в явном противоречии с классическим законом сложения скоростей.

Из двух постулатов теории относительности вытекают как следствия выводы о зависимости длительности интервалов времени и длин отрезков от выбора инерциальной системы отсчета.

Зависимость длительности интервалов времени и длин отрезков от скорости движения системы отсчета приводит к тому, что релятивистский закон сложения скоростей при переходе из одной системы отсчета в другую существенно отличается от классического закона сложения скоростей.

Если тело движется со скоростью $\vec{v}_2$ в одной системе отсчета, то в другой системе отсчета, относительно которой первая система отсчета движется со скоростью $\vec{v}_1$ ($\vec{v}_1 \uparrow\uparrow \vec{v}_2$), скорость тела определяется выражением

$$v=\frac{v_1+v_2}{1+\frac{v_1 v_2}{c^2}}. \qquad (81.1)$$

Зависимость массы тела от скорости. Зависимость свойств пространства и времени от движения системы отсчета приводит к тому, что сохраняющейся при любых взаимодействиях тел является величина

$$\vec{p}=\frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}, \qquad (81.2)$$

Формулы

Механические гармонические колебания

$$x = x_m \cos(\omega t + \varphi), \quad \omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}, \quad \nu = \frac{1}{T}.$$

$$a_x \approx -\frac{g}{l}x, \quad x'' = -\frac{g}{l}x, \quad \omega^2 = \frac{g}{l}, \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

$$a_x = -\frac{k}{m}x, \quad x'' = -\frac{k}{m}x, \quad \omega^2 = \frac{k}{m}, \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Электромагнитные гармонические колебания

$$u_C = -u_L, \quad \frac{q}{C} = -Li' = -Lq'', \quad q'' = -\frac{1}{LC}q, \quad q = q_0 \cos \omega t.$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Виток в однородном магнитном поле

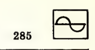
$$e = -\Phi', \quad \Phi = BS \cos \omega t, \quad e = BS\omega \sin \omega t.$$

Индуктивность и емкость в цепи переменного тока

$$i = I_m \cos \omega t.$$

$$u_L = U_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad U_m = I_m L\omega, \quad X_L = \frac{U_m}{I_m} = L\omega.$$

$$u_C = U_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad U_m = \frac{I_m}{\omega C}, \quad X_C = \frac{U_m}{I_m} = \frac{1}{\omega C}.$$



	Обозначения	Единицы
	x — координата	1 м
	x_m — амплитуда колебаний	1 м
	ω — циклическая частота	
	$\varphi=\omega t+\varphi_0$ — фаза	
	φ_0 — начальная фаза	
	ν — частота периодического процесса	1 Гц
	T — период колебания	1 с
	g — ускорение свободного падения	
	q — электрический заряд	1 Кл
	e — ЭДС индукции	1 В
	i — мгновенное значение силы тока	1 А
	Φ — магнитный поток	1 Вб
	S — площадь контура	1 $м^2$
	B — магнитная индукция	1 Тл
	u_L — мгновенное значение напряжения на катушке	1 В
	u_C — мгновенное значение напряжения на конденсаторе	1 В
	U_m — амплитуда колебаний напряжения	1 В
	I_m — амплитуда колебаний силы тока	1 А
	X_L — индуктивное сопротивление	1 Ом
	X_C — емкостное сопротивление	1 Ом



Формулы

Длина волны

$$\lambda = vT, \qquad v = \lambda\nu.$$

Преломление волн

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n = \text{const}.$$

Преломление света

$$n = \frac{c}{v_1}, \qquad n_{1,2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Интерференция волн

$$\Delta l = (2k+1)\frac{\lambda}{2} - \min, \qquad \Delta l = 2k\frac{\lambda}{2} - \max.$$

Дифракционная решетка

$$\Delta l = d\sin\varphi, \qquad d\sin\varphi = k\lambda - \max.$$

Формула линзы

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}.$$

Увеличение линзы

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}.$$

Оптическая сила линзы

$$D = \frac{1}{F}.$$

Линза собирающая: $F > 0$, $d > 0$.

Линза рассеивающая: $F < 0$, $d > 0$.

Изображение действительное: $f > 0$.

Изображение мнимое: $f < 0$.

Релятивистский закон сложения скоростей

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

Релятивистский импульс

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Релятивистская масса

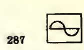
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Закон взаимосвязи массы и энергии

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

Полная энергия тела

$$E = mc^2.$$



	Обозначения	Единиицы и значеиия величии
	λ — длина волны	1 м
	v — скорость распространения колебаиий	1 м/с
	T — период колебания	1 с
	ν — частота	1 Гц
	c — скорость света в вакууме	$c=2{,}998\cdot 10^8$ м/с
	$n_{1,2}$ — относительиый показатель преломлеиия	
	n_1, n_2 — абсолютные показатели преломления	
	$\Delta l=l_1-l_2$ — разиость хода	
	d — период решетки	
	F — фокусное расстояние линзы	
	f — расстояиие до изображения	
	d — расстояиие до предмета	
	Γ — увеличение	
	D — оптическая сила линзы	1 дптр
	m_0 — масса покоя	
	m — релятивистская масса	
	p — релятивистский импульс	
	Δm — измеиеиие массы	
	ΔE — измеиение эиергии	
	E — полная энергия тела	

называемая релятивистским импульсом, а не классический импульс.

Классический закон сложения скоростей и классический закон сохранения импульса являются частными случаями универсальных релятивистских законов и выполняются только при значениях скоростей, значительно меньших скорости света в вакууме.

Релятивистский импульс тела можно рассматривать как произведение релятивистской массы m тела на скорость его движения. Релятивистская масса m тела возрастает с увеличением скорости по закону

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \qquad (81.3)$$

где m_0 — масса покоя тела; v — скорость его движения.

Возрастание массы тела с увеличением скорости приводит к тому, что ни одно тело с массой покоя, не равной нулю, не может достигнуть скорости, равной скорости света в вакууме, или превысить эту скорость.

Закон взаимосвязи массы и энергии. Из экспериментально установленного факта зависимости массы тел от скорости их движения следует, что масса тела и его энергия взаимно связаны.

При любых взаимодействиях изменение полной энергии тела ΔE равно произведению изменения массы Δm на квадрат скорости света в вакууме:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2. \qquad (81.4)$$

Уравнение (81.4) выражает не что иное, как универсальный закон природы, который называют законом взаимосвязи массы и энергии.

На основании открытия взаимосвязи массы и энергии тела А. Эйнштейн высказал предположение о том, что любое тело, имеющее массу покоя m_0, обладает энергией E_0 в соответствии с уравнением

$$E_0 = m_0 c^2. \qquad (81.5)$$

Эту энергию E_0 он назвал энергией покоя или собственной энергией тела.

Полная энергия E движущегося тела равна произведению его массы на квадрат скорости света:

$$E = mc^2. \qquad (81.6)$$

Полная энергия тела складывается из энергии покоя тела и кинетической энергии, поэтому точное релятивистское выражение для кинетической энергии E_k тела имеет следующий вид:

$$E = E_0 + E_k,\ E_k = E - E_0,$$
$$E_k = mc^2 - m_0 c^2. \qquad (81.7)$$

Гипотеза Эйнштейна о существовании собственной энергии тела подтверждается многочисленными экспериментами. На основе использования закона взаимосвязи массы и энергии ведутся расчеты выхода энергии в различных ядерных энергетических установках.



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

136. Длина маятника, демонстрирующего вращение Земли в Исаакиевском соборе в Ленинграде, равна 98 м. Определите период его свободных колебаний.

Решение

Так как амплитуда колебаний маятника и размеры тела на подвесе малы по сравнению с длиной подвеса, его колебания можно считать гармоническими и для описания колебаний применить формулу периода колебаний математического маятника:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\ ; \qquad T=2\cdot 3{,}14\sqrt{\frac{98\ \text{м}}{9{,}8\ \text{м/с}^2}}\approx 20\ \text{с}.$$

137. При подвешивании груза массой 1 кг стальная пружина в положении равновесия удлинилась на 1 см. С каким периодом будет совершать колебания этот груз на пружине после смещения его по вертикали из положения равновесия?

Решение

Под действием силы упругости пружины тело массой m совершает гармонические колебания с периодом, определяемым по формуле

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

где k — жесткость пружины.

Жесткость пружины можно найти по ее удлинению под действием силы тяжести груза массой m. По закону Гука

$$(F_y)_x=-kx.$$

Для модуля силы упругости в положении равновесия выполняется равенство

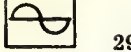
$$F_y=kx_0=mg,$$

следовательно,

$$k=\frac{mg}{x_0}.$$

Подставляем полученное выражение в формулу для вычисления периода колебаний:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{mx_0}{mg}}=2\pi\sqrt{\frac{x_0}{g}}\ ; \qquad T\approx 2\cdot 3{,}14\sqrt{\frac{10^{-2}\ \text{м}}{9{,}8\ \text{м/с}^2}}\approx 0{,}2\ \text{с}.$$



Мы получили, что для решения задачи достаточно было знать только удлинение пружины в положении равновесия, так как масса тела не входит в окончательную расчетную формулу.

138. Какую электроемкость должен иметь конденсатор для того, чтобы состоящий из этого конденсатора и катушки индуктивностью 10 мГн колебательный контур радиоприемника был настроен на волну 1000 м?

Решение

Для настройки приемника на заданную волну частота собственных колебаний в контуре должна быть равной частоте колебаний в принимаемой волне. Частота собственных колебаний в контуре определяется из формулы Томсона:

$$T=2\pi\sqrt{LC}, \qquad \nu=\frac{1}{T}=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Частота ν колебаний связана с длиной волны λ и скоростью ее распространения v формулой

$$\nu=\frac{v}{\lambda}.$$

Отсюда для вычисления электроемкости конденсатора получаем выражение

$$\frac{v}{\lambda}=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \qquad C=\frac{\lambda^2}{v^2\cdot 4\pi^2 L}.$$

Скорость v распространения радиоволн равна примерно $3\cdot 10^8$ м/с, поэтому получаем

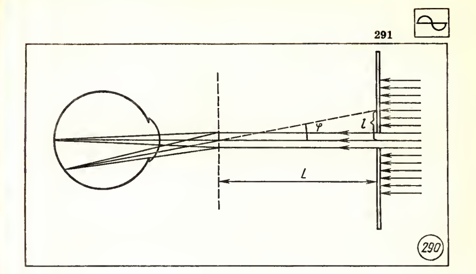
$$C=\frac{10^6}{9\cdot 10^{16}\cdot 4\cdot 10\cdot 10^{-2}}\ \Phi\approx 2{,}8\cdot 10^{-11}\ \Phi.$$

139. Человек находится на расстоянии 2 м от плоского зеркала. На сколько изменится расстояние между человеком и его изображением, если человек приблизится к зеркалу на 1 м?

Решение

Изображение в плоском зеркале находится за зеркалом на расстоянии, равном расстоянию от предмета до зеркала. При приближении человека к зеркалу на 1 м изображение приближается к зеркалу также на 1 м, а расстояние между человеком и его изображением уменьшается на 2 м.

140. При наблюдении через дифракционную решетку красный край спектра виден на расстоянии 3,5 см от середины щели в экране. Расстояние от дифракционной решетки до экрана — 50 см, период решетки — 10^{-2} мм. Определите длину волны красного света.



Решение

$d = 10^{-2}$ мм $= 10^{-5}$ м
$L = 50$ см $= 0{,}5$ м
$l = 3{,}5$ см $= 3{,}5 \cdot 10^{-2}$ м

λ — ?

Запишем условие первого максимума:

$$\lambda = d \sin \varphi.$$

Так как угол φ очень мал, справедливо равенство

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx \frac{l}{L} \text{ (рис. 290).}$$

Тогда для определения длины волны получим выражение

$$\lambda \approx d \frac{l}{L}, \qquad \lambda = \frac{10^{-5} \cdot 3{,}5 \cdot 10^{-2}}{0{,}5} \text{ м} \approx 7 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

141. На экран A (рис. 291) от точечного источника, находящегося от него на большом расстоянии, падает свет с длиной волны 560 нм. В экране имеются две параллельные щели на расстоянии 10^{-4} м одна от другой. Определите расстояние между двумя соседними полосами интерференционных максимумов, наблюдаемых на экране B, расположенном параллельно экрану A на расстоянии 1 м от него.

Решение

$d = 10^{-4}$ м
$l = 1$ м
$\lambda = 5{,}6 \cdot 10^{-7}$ м

Δh — ?

В произвольной точке C экрана B (см. рис. 291) будет наблюдаться интерференционный максимум при выполнении условия

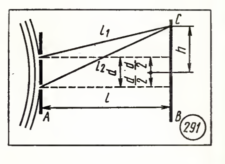
$$l_2 - l_1 = k\lambda.$$



Из рисунка видно, что

$$l_1^2 = l^2 + \left(h_k - \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$l_2^2 = l^2 + \left(h_k + \frac{d}{2}\right)^2.$$



Отсюда следует, что

$$l_2^2 - l_1^2 = 2h_k d, \quad (l_2 - l_1)(l_2 + l_1) = 2h_k d,$$

$$l_2 - l_1 = \frac{2h_k d}{l_2 + l_1}.$$

В случае, когда $h_k \ll l$, можно считать справедливым приближенное равенство $l_2 + l_1 \approx 2l$.

Тогда $\quad l_2 - l_1 = \frac{h_k d}{l}$.

Приравнивая два выражения для разности $l_2 - l_1$, получаем $\frac{h_k d}{l} = k\lambda$,

откуда $\quad h_k = \frac{kl\lambda}{d}$.

Искомое расстояние Δh между соседними интерференционными полосами найдем так: $\quad \Delta h = h_{k+1} - h_k = \frac{\lambda l}{d}$.

Подставляя значения величин, получаем

$$\Delta h = \frac{5{,}6 \cdot 10^{-7}\ \text{м} \cdot 1\ \text{м}}{10^{-4}\ \text{м}} = 5{,}6 \cdot 10^{-3}\ \text{м}.$$

142. Лампа находится на расстоянии 2 м от экрана. На каком расстоянии от лампы нужно поставить собирающую линзу с фокусным расстоянием 0,4 м, для того чтобы получить на экране увеличенное изображение лампы?

Решение

$F = 0{,}4$ м
$d + f = 2$ м
---
d — ?

В формулу линзы $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ подставим $f = 2 - d$;

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{2-d} = \frac{2}{d(2-d)};$$

$$d(2-d) = 2F, \qquad d(2-d) = 0{,}8,$$

$$d^2 - 2d + 0{,}8 = 0, \qquad d = 1 \pm \sqrt{1 - 0{,}8} \approx 1 \pm 0{,}45,$$

$$d_1 = 0{,}55\ \text{м}, \quad d_2 = 1{,}45\ \text{м}.$$

Получению увеличенного изображения соответствует значение $d_1 = 0{,}55$ м.



143. На каком расстоянии от собирающей линзы с фокусным расстоянием 10 см нужно поставить предмет, для того чтобы получить действительное изображение с увеличением в 10 раз?

Решение

$F = 10$ см
$\Gamma = 10$

d — ?

Увеличение Г равно $\Gamma = \frac{f}{d}$, отсюда $\frac{f}{d} = 10$; следовательно, $f = 10d$.

Воспользуемся формулой тонкой линзы:

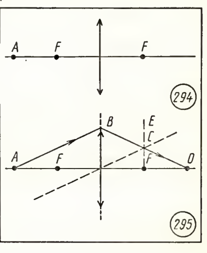
$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{10d} + \frac{1}{d} = \frac{11}{10d}; \quad d = \frac{11F}{10}; \quad d = \frac{11 \cdot 10 \text{ см}}{10} = 11 \text{ см}.$$

144. На рисунке 292 показана главная оптическая ось линзы O_1O_2. Линза дает изображение точки A в точке B. Найдите построением хода лучей положение оптического центра линзы и ее главных фокусов.

Решение

При прохождении через линзу один из всех лучей, выходящих из точки A, попадает в точку B по прямой без изменения направления распространения. Это луч, проходящий через оптический центр линзы. Следовательно, оптический центр лежит на главной оптической оси O_1O_2 и на прямой AB, поэтому точка O пересечения прямой AB и главной оптической оси O_1O_2 и является оптическим центром линзы O (рис. 293).

Чтобы найти положение главных фокусов линзы, проведем через точку O прямую, перпендикулярную главной оптической оси и отмечающую положение линзы. Так как предмет и его изображение находятся по разные стороны от линзы, изображение действительное. Следовательно, линза собирающая.



294

Для нахождения положения главного фокуса собирающей линзы выберем луч, идущий из точки A параллельно главной оптической оси. Этот луч после преломления в линзе попадает в точку B, как и все остальные лучи, выходящие из точки A. Вместе с тем луч, параллельный главной оптической оси, при выходе из линзы проходит через ее главный фокус, лежащий на главной оптической оси. Следовательно, точка пересечения этого луча с главной оптической осью является главным фокусом линзы. Второй главный фокус расположен на главной оптической оси по другую сторону от оптического центра на таком же расстоянии, как и первый.

145. Найдите построением хода лучей изображение точки A, лежащей на главной оптической оси собирающей линзы. Положение главных фокусов линзы указано на рисунке 294.

Решение

Для нахождения изображения точки A выберем произвольно направленный луч AB. Чтобы найти направление его распространения после прохождения линзы, проведем через оптический центр линзы побочную ось, параллельную лучу AB (рис. 295). Лучи, параллельные побочной оси, собираются в одну точку, находящуюся в фокальной плоскости линзы. Отметим на рисунке положение этой плоскости прямой FE.

Луч AB после преломления в линзе проходит через точку C пересечения побочной оси с фокальной плоскостью. Прямая, проходящая через точки B и C, отмечает направление распространения луча AB после преломления в линзе. Точка D пересечения луча с главной оптической осью и является изображением точки A.

146. Определите оптическую силу D системы из двух тонких линз с оптической силой D_1 и D_2.

Решение

Представим себе, что точечный источник света помещается в главном фокусе первой линзы. Если вторая линза расположена вплотную к первой, то параллельный пучок света, выходящий из первой линзы, собирается в главном фокусе второй линзы.

Применяя формулу линзы для системы из двух линз, получаем:

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F},$$

где F — фокусное расстояние системы из двух линз.

Так как в данном случае $d=F_1$ и $f=F_2$, то

$$\frac{1}{F_1}+\frac{1}{F_2}=\frac{1}{F}, \qquad \text{или} \qquad D_1+D_2=D.$$

Мы получили, что оптическая сила системы из двух тонких линз равна сумме оптических сил этих линз.



147. Расстояние от оптического центра глаза до сетчатки 18,3 мм. Человек пользуется очками с оптической силой +2 дптр для чтения газеты на расстоянии 25 см. На каком расстоянии от глаз он вынужден держать газету для чтения без очков? Оптическая сила нормального глаза 58,5 дптр.

Решение

$f_1 = 18{,}3$ мм $= 1{,}83 \times 10^{-2}$ м
$D_0 = 58{,}5$ дптр
$D_1 = +2$ дптр
$d_1 = 25$ см $= 2{,}5 \cdot 10^{-1}$ м

d_2 — ?

Расстояние d_2 до предмета связано с расстоянием f_2 до изображения и фокусным расстоянием F_2 или оптической силой D_2 формулой линзы:

$$\frac{1}{f_2} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{F_2} = D_2.$$

Из формулы линзы получаем $\quad d_2 = \dfrac{f_2}{D_2 f_2 - 1}$.

Так как изображение в первом и втором случаях должно быть на сетчатке глаза, выполняется равенство $f_2 = f_1 = 1{,}83 \cdot 10^{-2}$ м.

Оптическая сила глаза с очками равна оптической силе нормального глаза D_0 и равна сумме оптической силы D_2 глаза без очков и оптической силы D_1 линзы очков: $D_0 = D_1 + D_2$. Отсюда $D_2 = D_0 - D_1$; $D_2 = 58{,}5$ дптр $- 2$ дптр $= 56{,}5$ дптр.

Расстояние до газеты получается равным

$$d_2 = \frac{1{,}83 \cdot 10^{-2}}{56{,}5 \cdot 1{,}83 \cdot 10^{-2} - 1} \approx 5{,}4 \cdot 10^{-1} \text{ м} = 54 \text{ см}.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

148. Во сколько раз нужно уменьшить длину математического маятника, для того чтобы период его колебаний уменьшился в 3 раза?

149. С каким периодом будет совершать колебания математический маятник длиной 1 м на поверхности Луны? Ускорение силы тяжести на Луне 1,62 м/с^2.

150. Найдите длину звуковой волны в воздухе при частоте 2000 Гц. Скорость звука в воздухе 343 м/с.

151. После вспышки молнии гром прогремел через 6 с. На каком расстоянии от наблюдателя произошел грозовой разряд?

152. Как изменится период свободных колебаний в электрическом контуре при увеличении электроемкости конденсатора в 2 раза?

153. Как изменится частота свободных колебаний в электрическом контуре при уменьшении индуктивности катушки в 4 раза?

154. Виток провода площадью $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ м^2 вращается с частотой 5 с$^{-1}$ в однородном магнитном поле с индукцией 1,1 Тл. Определите амплитуду колебаний ЭДС индукции в витке.

155. С какой частотой должен вращаться виток провода в однородном магнитном поле с индукцией 1,2 Тл, чтобы амплитуда колебаний ЭДС индукции в нем была 1 В? Площадь витка $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ м^2.

156. Найдите среднюю мощность, выделяющуюся на активном сопротивлении в цепи переменного тока при амплитудном значении силы тока 2 А и амплитудном значении напряжения 310 В.

157. Найдите активное сопротивление электрической лампы накаливания, включенной в цепь переменного тока с действующим напряжением 220 В, при этом выделяется средняя мощность 100 Вт.

158. При подключении к концам катушки переменного напряжения с частотой 50 Гц в цепи при действующем значении напряжения 50 В течет переменный ток с действующим значением 0,2 А. Найдите индуктивность катушки. Активное сопротивление катушки пренебрежимо мало.

159. Найдите емкостное сопротивление конденсатора электроемкостью 10 мкФ в цепи переменного тока с частотой 50 Гц.

160. При какой частоте переменного тока емкостное сопротивление конденсатора электроемкостью 200 нФ будет равно 1 кОм?

161. Какой электроемкостью должен обладать конденсатор, для того чтобы при включении его в цепь переменного тока с частотой 1000 Гц при действующем напряжении 2 В действующее значение силы тока в цепи было равно 20 мА?

162. Найдите резонансную частоту последовательной цепи переменного тока конденсатора емкостью 10 мкФ и катушки индуктивностью 1 Гн с активным сопротивлением 10 Ом.

163. Ротор электрического генератора длиной 7 м и диаметром 1,25 м вращается с частотой 3000 оборотов в минуту. Индукция магнитного поля 2 Тл. Определите амплитуду колебаний ЭДС индукции в одном витке обмотки генератора.

164. Определите фокусное расстояние линзы, если при расстоянии 40 см от линзы до предмета действительное изображение получается на расстоянии 2 м от линзы.

165. Определите фокусное расстояние линзы, если при расстоянии 20 см от линзы до предмета мнимое изображение получается на расстоянии 10 см от линзы.

166. Лампа находится на расстоянии 1 м от экрана. На каком расстоянии от лампы нужно поставить собирающую линзу с фокусным расстоянием 0,2 м, для того чтобы на экране получить увеличенное изображение лампы?

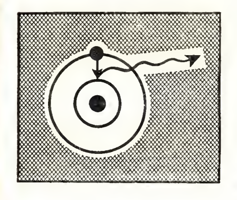
167. Изображение человека во весь рост на кадре пленки размером 6 см $\times$ 6 см удается получить при расстоянии 4 м. Каково фокусное расстояние объектива, если рост человека 1,8 м?

168. При какой скорости масса тела увеличивается в 2 раза?

169. Мировое потребление энергии человечеством составляет примерно $3 \cdot 10^{20}$ Дж в год. Для производства такого количества энергии необходимо сжечь 10 млрд. т угля. Сколько тонн угля в год понадобилось бы для обеспечения всех энергетических потребностей человечества, если бы использовалась вся его энергия?

170. Мощность излучения Солнца $3{,}8 \cdot 10^{23}$ кВт. Вычислите уменьшение массы Солнца за 1 с за счет этого излучения.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА



82. Квантовые свойства света . 298
83. Доказательства сложной структуры атомов . . . 306
84. Квантовые постулаты Бора 310
85. Лазер 314
86. Атомное ядро 317
87. Радиоактивность . . . 321
88. Свойства ядерных излучений 324
89. Экспериментальные методы регистрации заряженных частиц 326
90. Цепная реакция деления ядер урана 329
91. Элементарные частицы . 333

Примеры решения задач . . 340
Задачи для самостоятельного решения 345



82. КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

Распределение энергии в спектре излучения нагретых твердых тел. Изучение явлений дифракции, интерференции и поляризации света привело к утверждению электромагнитной волновой теории света.

Излучение электромагнитных волн в диапазоне радиоволн происходит при ускоренном движении электронов, например при колебаниях электронов в антенне радиопередатчика. Можно предположить, что излучение видимого света нагретыми телами также обусловлено колебательными движениями электронов, только с частотами гораздо более высокими, чем в антенне радиопередатчика.

Проверка правильности такого предположения могла быть выполнена путем сравнения теоретически предсказываемого электромагнитной теорией закона распределения энергии в сплошном спектре излучения нагретого тела с наблюдаемым экспериментально.

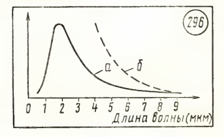
Пример экспериментально полученной кривой распределения энергии в спектре излучения нагретого тела представлен на рисунке 296, *а*. По оси абсцисс отложены длины волн, по оси ординат — мощность излучения единицы поверхности светящегося тела в единичном интервале длин волн.

Попытка теоретического вывода закона распределения энергии в сплошном спектре была сделана английским физиком Д. Рэлеем. Рэлей рассматривал излучение в замкнутом объеме как систему стоячих монохроматических волн.

Полученный из таких предположений закон распределения энергии в сплошном спектре излучения представлен на рисунке 296, *б*.

По этому закону мощность излучения должна непрерывно возрастать с уменьшением длины волны излучения. Это значит, что в тепловом излучении должно быть много ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, чего на самом деле не наблюдается. Если бы этот закон выполнялся во всем диапазоне частот, то полная энергия излучения светящегося тела была бы бесконечно большой.

Гипотеза Планка. Стремясь преодолеть затруднения классической теории при объяснении излучения нагретого твердого тела, немецкий физик Макс Планк в



1900 г. высказал гипотезу, которая положила начало подлинной революции в теоретической физике. Смысл этой гипотезы заключается в том, что запас энергии колебательной системы, находящейся в равновесии с электромагнитным излучением, не может принимать любые значения. Энергия элементарных систем, поглощающих и излучающих электромагнитные волны, обязательно должна быть равна целому кратному некоторого определенного количества энергии.

Минимальное количество энергии, которое система может поглотить или излучить, называется квантом энергии. Энергия кванта E должна быть пропорциональна частоте колебаний ν:

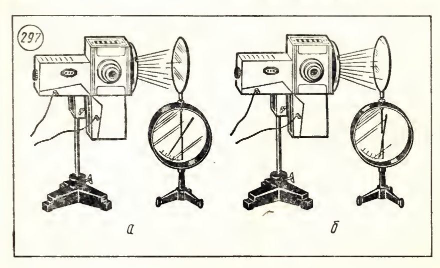
$$E = h\nu. \qquad (82.1)$$

Коэффициент пропорциональности h в этом выражении носит название постоянной Планка. Постоянная Планка равна $6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Исходя из этой новой идеи, Планк получил закон распределения энергии в спектре, хорошо согласующийся с экспериментальными данными. Хорошее согласие теоретически предсказанного закона с экспериментом было основательным подтверждением квантовой гипотезы Планка.

Открытие фотоэффекта. Гипотеза Планка о квантах послужила основой для объяснения явления фотоэлектрического эффекта, открытого в 1887 г немецким физиком Генрихом Герцем.

Явление фотоэффекта обнаруживается при освещении цинковой пластины, соединенной со стержнем электрометра. Если пластине и стержню передан положительный заряд, то электрометр не разряжается при освещении пластины (рис. 297, *а*). При сообщении пластине отрицательного электрического заряда электрометр разряжается, как только на пластину попадает ультрафиолетовое излучение (рис. 297, *б*). Этот опыт доказывает, что с по-

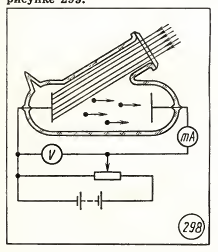


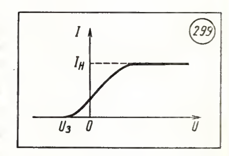
верхности металлической пластины под действием света могут освобождаться отрицательные электрические заряды. Измерение заряда и массы частиц, вырываемых светом, показало, что эти частицы — электроны.

Явление испускания электронов веществом под действием электромагнитного излучения называется *фотоэффектом.*

Законы фотоэффекта. Количественные закономерности фотоэлектрического эффекта были установлены выдающимся русским физиком **Александром Григорьевичем Столетовым** (1839—1896) в 1888—1889 гг. Используя вакуумный стеклянный баллон с двумя электродами (рис. 298), он исследовал зависимость силы тока в баллоне от напряжения между электродами и условий освещения электрода.

При неизменных условиях освещения одного электрода зависимость силы тока от напряжения имела вид, представленный на рисунке 299.





Если подключить к освещаемому электроду отрицательный полюс батареи, то сначала сила тока с повышением напряжения возрастает, а затем сила тока остается постоянной. Сила тока насыщения $I_н$ пропорциональна мощности светового потока излучения. Этому случаю соответствует участок графика на рисунке 299 слева от оси ординат. Измерив запирающее напряжение, можно найти максимальное значение кинетической энергии электронов, вырываемых светом из катода:

$$\frac{mv^2_{\max}}{2} = eU_з. \qquad (82.2)$$

Оказалось, что задерживающее напряжение, а значит, и кинетическая энергия фотоэлектронов не зависят от мощности светового излучения, но увеличиваются с возрастанием частоты света.

Перечисленные экспериментальные факты позволили сформулировать следующие законы фотоэффекта:

1. Сила тока насыщения прямо пропорциональна мощности светового излучения, падающего на поверхность тела.

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света

и не зависит от мощности светового излучения.

3. Если частота света меньше некоторой определенной для данного вещества минимальной частоты, то фотоэффект не происходит (красная граница фотоэффекта).

Затруднения волновой теории при объяснении фотоэффекта. Объяснить основные законы фотоэффекта на основе электромагнитной теории света не удалось.

Согласно электромагнитной теории под действием света, падающего, например, на поверхность твердого тела, должны приходить в вынужденные колебания одновременно все электроны в слое вещества такой толщины, на которую проникает в него электромагнитная (световая) волна.

Для освобождения с поверхности тела электрон должен обладать кинетической энергией, превышающей работу выхода A.

Интервал времени τ, в течение которого электрон может накопить энергию, необходимую для своего освобождения, можно определить, разделив работу выхода на значение энергии, приобретаемой электроном в единицу времени от электромагнитного поля.

Время запаздывания по расчетам на основе электромагнитной теории света должно быть весьма значительным, по крайней мере, должно составлять несколько десятков минут. В действительности же фотоэффект возникал сразу же после начала освещения; никакого запаздывания, хотя бы на миллионные доли секунды, в экспериментах не наблюдалось.

Электромагнитная теория света не могла объяснить независимость энергии фотоэлектронов от мощности светового излучения, существование красной границы фотоэффекта, пропорциональность кинетической энергии фотоэлектронов частоте света.

Фотоны. Объяснение основных законов фотоэффекта было дано А л ь б е р т о м Э й н ш т е й н о м (1879—1955) в 1905 г. Гипотезу Планка об излучении света в виде отдельных порций — квантов с энергией, пропорциональной частоте света, А. Эйнштейн дополнил предположением о дискретности, локализации этих квантов в пространстве.

Согласно квантовым представлениям свет — это поток особых частиц — фотонов. Энергия каждого фотона определяется формулой

$$E = h\nu, \qquad (82.3)$$

где $h = 6{,}626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с$^{-1}$ — постоянная Планка; ν — частота света.

На основе представлений о фотоне как частице, которая может излучаться или поглощаться лишь как целое, явление фотоэффекта получает простое объяснение: поглощая один фотон, электрон внутри фотокатода увеличивает свою энергию на значение энергии фотона $h\nu$.

При условии $h\nu > A$ электрон может покинуть фотокатод. Если на пути к поверхности фотокатода этот электрон не растратит часть полученной от фотона энергии во взаимодействиях с электронами других атомов, то он выйдет из

фотокатода с кинетической энергией:

$$E_k = h\nu - A. \qquad (82.4)$$

Это соотношение называется *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*.

Таким образом, фотонная теория света объяснила наблюдаемую экспериментально линейную зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света, вызывающего фотоэффект.

Красная граница фотоэффекта в фотонной теории определяется из уравнения Эйнштейна условием равенства энергии фотона работе выхода электрона A:

$$h\nu_{\min} = A,$$

откуда

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}. \qquad (82.5)$$

Становится понятным и отсутствие запаздывания возникновения фототока после начала освещения: фотон, достигший фотокатода, практически мгновенно может освободить из него один электрон. Пропорциональность силы фототока мощности излучения в фотонной теории просто очевидна, так как, чем больше фотонов падает на поверхность тела, тем больше электронов они освобождают.

Эффект Комптона. Объяснение законов фотоэффекта на основе гипотезы о существовании фотонов было большим успехом гипотезы, но не являлось ее строгим доказательством. Для доказательства существования фотонов как обособленных в пространстве частиц, обладающих массой и импульсом, необходимо было экспериментально обнаружить взаимодействие отдельных фотонов с другими частицами. Опыт такого рода впервые удалось осуществить американскому физику Артуру Комптону в 1922 г. Комптон установил, что при прохождении пучка рентгеновских лучей через слой вещества возникает рассеянное рентгеновское излучение с частотой ν', меньшей частоты ν первичного пучка.

Согласно волновой теории механизм рассеяния рентгеновского излучения объясняется возникновением вторичных электромагнитных волн в результате вынужденных колебаний электронов в атомах вещества под действием переменного электрического поля первичного пучка. При этом частота рассеянного рентгеновского излучения должна почти точно совпадать с частотой первичного излучения. Наблюдаемое же различие частот первичного и рассеянного излучений волновая теория объяснить не могла.

Если же считать пучок рентгеновских лучей состоящим из отдельных частиц — фотонов, летящих со скоростью света и способных испытывать столкновения с другими частицами, то следует допустить возможность обмена фотонов с электронами энергией и импульсом. Тогда результаты опытов Комптона легко объяснить.

Рентгеновский фотон с частотой ν обладает энергией E и импульсом p. При столкновении фотона с электроном, находящимся в покое, происходит передача части энергии и импульса фотона этому электрону. Уменьшение

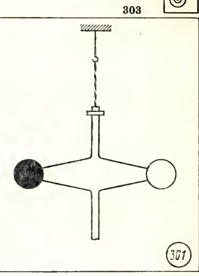
энергин фотона в результате столкновення прнводит к уменьшенню его частоты (рис. **300**).

Вычислеиня, выполнениые на основе представлений о фотонах как о частицах, способных испытывать столкновення с электроиамн н другими частицамн, дают результаты, полностью согласующиеся с результатамн эксперимента.

Давление света. С представлением о свете как о потоке частиц связано предположение о существованин светового давления. Еслн частнца света обладает массой m, то прн столкновеиин ее с поверхностью твердого тела может произойти лнбо поглощенне частицы, либо ее отражение. В первом случае измененне нмпульса частицы равно $\Delta p = mv$, во втором оно в два раза больше: $\Delta p = 2mv$. Поэтому прн одинаковой плотности потока светового нзлучения давленне света на зеркальную поверхность должно быть в два раза больше давления на чериую поверхность, поглощающую свет.

Экспериментальное доказательство существовання светового давления было получено впервые выдающимся русскнм фнзиком Петром Нниколаевнчем Лебедевым (1866—1912) лишь в 1900 г.

В опытах П. Н. Лебедева одинаковые световые потоки направлялись на два легкнх металлических днска, подвешенных на тонкой нити (рнс. 301). Однн днск был зеркальным н отражал падающнй на него свет, второй был черным н поглощал падающий свет. При одновремениом освещенни двух дисков пронсходнл нх поворот вокруг вертикальной осн. По углу закручивання упругой нити подвеса можно было измерить момент снл, вызывающих этот поворот. Закручивание нити подвеса пронсходило в таком направленни, которое соответствует большей снле давления света на зеркально отражающий днск.



Обнаружнть световое давленне было очень трудно, так как оно очень мало.

Сила светового давления в природных явлениях не всегда пренебрежнмо мала по сравнению с другими снламн. В недрах звезд потоки светового излучения настолько велнкн, что сила светового давления становится сравннмой с снлой гравнтационного

взаимодействия и препятствует неограниченному сжатию звезд.

Дуализм свойств света. При исследовании законов фотоэффекта в опытах по наблюдению рассеяния фотонов на электронах обнаруживается квантовая, корпускулярная природа света. Но вместе с тем свет обнаруживает способность к дифракции, интерференции, преломлению, отражению, дисперсии, поляризации и все эти явления полностью объясняются на основе представлений о свете как электромагнитной волне.

Проявление светом как волновых, так и корпускулярных свойств называется корпускулярно-волновым дуализмом свойств света. Смысл корпускулярно-волнового дуализма свойств света заключается не в том, что свет одновременно является и волной, и потоком частиц. Тот факт, что свет в одних условиях обнаруживает сходство с потоком частиц, а в других — с поперечными волнами, показывает, что в действительности природа света более сложна и не может быть полностью правильно описана с применением наглядных и привычных нам образов классической физики. Например, утверждая, что фотон обладает импульсом и массой, нельзя забывать, что существует он только в движении со скоростью света и, следовательно, не обладает массой покоя. Смысл корпускулярно-волнового дуализма свойства света заключается в том, что свет имеет сложную природу, которая в зависимости от условий опыта лишь приближенно может быть описана с применением привычных нам представлений о волнах или частицах.

Применение фотоэффекта. Простейшим прибором, работающим на основе использования фотоэффекта, является *вакуумный фотоэлемент*. Вакуумный фотоэлемент состоит из стеклянной колбы, снабженной двумя электрическими выводами. Внутренняя поверхность колбы частично покрыта тонким слоем металла. Это покрытие служит катодом фотоэлемента. В центре баллона расположен анод. Выводы катода и анода подключаются к источнику постоянного напряжения. При освещении катода с его поверхности вырываются электроны. Этот процесс называется внешним фотоэффектом. Электроны движутся под действием электрического поля к аноду. В цепи фотоэлемента возникает электрический ток, сила тока пропорциональна мощности светового излучения. Таким образом фотоэлемент преобразует энергию светового излучения в энергию электрического тока.

Для преобразования энергии светового излучения в энергию электрического тока широко применяются и *полупроводниковые фотоэлементы*.

Полупроводниковый элемент имеет следующее устройство. В плоском кристалле кремния или другого полупроводника с дырочной проводимостью создается тонкий слой полупроводника с электронной проводимостью. На границе раздела этих слоев возникает $p-n$-переход. При освещении полупроводникового кристалла в результате поглощения света происходит изменение распределения электронов и дырок по энергиям. Этот процесс называет-

ся внутренним фотоэффектом. В результате внутреннего фотоэффекта увеличивается количество свободных электронов и дырок в полупроводнике, происходит их разделение на границе $p-n$-перехода.

При соединении противоположиых слоев полупроводиикового фотоэлемента проводником в цепи возиикает электрический ток; сила тока в цепи пропорциоиальна мощности светового потока излучеиия, падающего на фотоэлемент.

Включение фотоэлемеита последовательно с обмоткой электромагнитного реле позволяет автоматически включать или выключать исполнительные устройства при попадании света на фотоэлемент. Фотоэлементы используются в киио для воспроизведения звукового сопровождения, записанного иа киноленту в виде звуковой дорожки.

Полупроводниковые фотоэлементы широко используются на искусственных спутниках Земли, межпланетных автоматических станциях и орбитальных станциях в качестве энергетических установок, с помощью которых энергия солнечного излучеиия преобразуется в электрическую энергию. КПД современных полупроводниковых фотоэлектрических генераторов превышает 20%.

Полупроводниковые фотоэлементы все шире применяются в быту. Они используются в качестве невозобновляемых источников тока в часах, микрокалькуляторах; проходят испытания первые солнечные электромобили.

Фотохимические процессы. Под действием света могут происходить процессы диссоциации молекул, присоединения атомов к молекулам. Различные химические реакции, протекающие под действием света, называются **фотохимическими реакциями**. Наиболее значительными в живой природе являются фотохимические процессы фотосиитеза. В жизни человека большую роль играет способность глаза воспринимать свет. Поглощение фотона света в светочувствительной клетке сетчатки приводит к разложению молекулы белка — родопсина. При разложении молекулы родопсина возникает сигнал, который по нервным волокнам передается мозгу. В темноте родопсин восстанавливается, и клетки снова становятся способны к восприятию света.

С явлением внутреииего фотоэффекта связаны фотохимические процессы, протекающие под действием света в фотографических материалах. Фотоматериалы на основе серебра содержат кристаллы бромистого серебра $AgBr$ (или $AgCl$, AgJ), распределенные в тонком слое желатиновой эмульсии, нанесенной на стеклянную пластинку, пленку или бумагу.

Под действием света в кристалле бромистого серебра образуются нейтральные атомы серебра и брома, атомы серебра концентрируются вблизи дефектов кристаллической решетки и образуют там маленькие кристаллы металлического серебра.

Квантовый характер взаимодействия света с веществом проявляется в фотохимических про-

11 Заказ 937

цессах в том, что один акт химического превращения происходит при поглощении одного фотона света. Поэтому число атомов серебра, освобожденных в кристалле бромистого серебра под действием света, пропорционально числу фотонов, поглощенных этим кристаллом.

При открывании затвора фотоаппарата на короткое время объектив проецирует на фотопленку изображение предметов. В различных местах фотопленки освобождается разное количество свободных атомов серебра, в каждом месте число освобожденных атомов серебра пропорционально числу падающих фотонов света. Таким образом, в фотопленке возникает изображение из частиц металлического серебра. Частицы металлического серебра, возникающие в кристалле под действием света, очень малы. Поэтому изображение из кристаллов серебра, возникающее в фотопленке под действием света, называется скрытым изображением.

Для получения видимого изображения используется процесс *проявления.* Для проявления пленку в темноте погружают в раствор проявителя — вещества, способного восстанавливать бромистое серебро в свободное металлическое серебро. Такое восстановление наиболее эффективно происходит вокруг центров скрытого изображения.

Для того чтобы после проявления оставшиеся в пленке кристаллы бромистого серебра не могли восстановиться, производится процесс *фиксирования* в растворе тиосульфата натрия $Na_2S_2O_3$. Процесс фиксирования заключается в растворении кристаллов неразложившегося бромистого серебра.

Изображение на фотопленке получается негативным, т. е. светлым местам объекта соответствуют темные места фотографического изображения. Для получения нормального, позитивного, изображения производится повторный процесс фотографирования с негатива на фотобумагу, после чего производятся операции проявления и фиксирования.

83. ДОКАЗАТЕЛЬСТВА СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ АТОМОВ

Открытие электрона. Первые экспериментальные результаты, из которых можно было сделать вывод о сложной структуре атомов, о наличии внутри атомов электрических зарядов, были получены М. Фарадеем в 1833 г. при изучении законов электролиза.

В 1897 г. Дж. Дж. Томсон в результате экспериментов по изучению электрического разряда в разреженных газах, фотоэффекта и термоэлектронной эмиссии установил, что при соударениях атомов в плазме электрического разряда, при нагревании вещества или освещении его ультрафиолетовым светом из атомов любого химического элемента вырываются одинаковые отрицательно заряженные частицы. Эти части-

цы были названы *электронами*. Электрический заряд *e* отдельных электронов впервые был измерен в опытах Р. Милликена в 1909 г. Он оказался действительно одинаковым у всех электронов.

Масса электрона примерно в 2000 раз меньше массы самого легкого из атомов — атома водорода. Открытие электрона и обнаружение электронов в составе атомов любого химического элемента было первым доказательством сложности атомов.

Периодический закон Менделеева. Открытие Д. И. Менделеевым в 1869 г. периодического закона поставило перед физикой вопрос о причинах повторяемости химических свойств элементов, расположенных в порядке возрастания атомной массы. Естественно было предположить, что увеличение массы атомов химических элементов связано с увеличением числа частиц, входящих в их состав. Периодическую повторяемость химических свойств элементов в таблице Д. И. Менделеева можно рассматривать как свидетельство периодической повторяемости основных особенностей внутренней структуры атомов по мере увеличения числа частиц, входящих в их состав.

Линейчатые спектры. Важным фактором, свидетельствующим о сложной внутренней структуре атомов, было открытие линейчатых спектров. Исследования показали, что при нагревании до высокой температуры пары́ любого химического элемента испускают свет, узкий пучок которого разлагается призмой на несколько узких пучков света различного цвета. Совокупность наблюдаемых при этом разноцветных линий называется линейчатым спектром испускания. Линейчатый спектр испускания каждого химического элемента не совпадает со спектром испускания ни одного другого химического элемента.

Каждая отдельная линия в линейчатом спектре излучения образуется светом с одной длиной волны. Следовательно, источник света с линейчатым спектром излучения испускает электромагнитные волны не со всевозможными частотами, а только с несколькими вполне определенными ν_1, ν_2, ..., ν_n.

При пропускании белого света со сплошным спектром через пары́ вещества наблюдается возникновение темных линий на фоне сплошного спектра испускания. Темные линии расположены точно в тех местах, в которых наблюдаются светлые линии спектра излучения данного химического элемента. Такой спектр называется *линейчатым спектром поглощения*.

Линейчатые спектры поглощения свидетельствуют о том, что вещество в газообразном состоянии способно поглощать электромагнитное излучение только с такими частотами ν_1, ν_2, ..., ν_n, какие имеются в линейчатом спектре излучения данного вещества.

Свет с линейчатым спектром излучения испускается веществом в газообразном атомарном состоянии при невысоких давлениях, т. е. при условии слабого взаимодействия атомов между собой. При таких условиях испускание квантов электромагнитного



излучения является результатом процессов, происходящих внутри отдельных атомов.

После открытия электрона стала очевидной связь явлений излучения и поглощения света с наличием в них электронов. Действительно, свет — это электромагнитные волны. Излучение электромагнитных волн происходит при ускоренном движении электрических зарядов. Можно предположить, что при соударениях атомов электроны, имеющиеся внутри атомов, могут приобретать избыток энергии и затем излучать электромагнитные волны, совершая гармонические колебания внутри атомов. Различным длинам волн излучаемого света соответствуют различные частоты колебаний электронов внутри атомов. Следовательно, теория строения атома должна дать способы расчета длин волн в спектре любого химического элемента.

Радиоактивность. Еще одним доказательством сложности строения атомов явилось открытие явления радиоактивности. В 1896 г. французский физик Анри Беккерель (1852—1908) производил опыты с солями урана. Он установил, что атомы урана испускают невидимые глазом излучения, способные проникать через бумагу или картон и вызывать почернение фотографической пластинки.

Явление испускания атомами невидимых проникающих излучений назвали *радиоактивностью* (от слова «радиус» — луч).

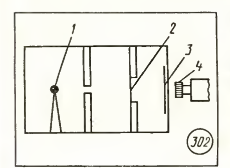
Польского происхождения физик Мария Склодовская-Кюри (1867—1934) и французский физик Пьер Кюри (1859—1906) доказали, что радиоактивные излучения испускаются не только атомами урана, но и атомами некоторых других элементов. По радиоактивному излучению ими были открыты два неизвестных ранее химических элемента — радий и полоний.

Исследования радиоактивного излучения показали, что радиоактивные атомы испускают не один, а три вида излучения различной физической природы. Эти излучения были названы альфа-, бета- и гамма-лучами. Альфа-лучи оказались потоком ионов гелия, бета-лучи — потоком электронов, а гамма-лучи — потоком квантов электромагнитного излучения с очень малой длиной волны, порядка 10^{-11} — -10^{-13} м.

В результате радиоактивного распада, как впервые доказали в 1902 г. английские ученые Эрнест Резерфорд (1871—1937) и Фредерик Содди (1877—1956), происходит превращение атомов одного химического элемента в атомы другого химического элемента. Например, атом урана в результате радиоактивного распада превращается в два атома — атом тория и атом гелия. Открытие явления радиоактивного распада доказывало сложность внутренней структуры атомов, опровергало представление о неизменности, неразрушимости атомов.

Опыты по рассеянию альфа-частиц. Большие успехи в исследовании структуры атомов были достигнуты в опытах Резерфорда по изучению рассеяния быстрых





заряженных частиц при прохождении через тонкие слои вещества. В этих опытах узкий пучок альфа-частиц, испускаемых радиоактивным веществом *1*, направлялся на тонкую металлическую пластинку *2*. За пластиной помещался экран *3*, покрытый слоем кристаллов сульфида цинка, способных светиться под ударами быстрых заряженных частиц (рис. 302). Было обнаружено, что большинство альфа-частиц отклоняется от прямолинейного пути на углы не более 1—2°. Однако небольшая доля альфа-частиц испытывала отклонение на значительно большие углы.

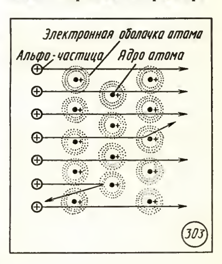
Модель атома Резерфорда. Рассеяние отдельных альфа-частиц на большие углы Резерфорд объяснил тем, что положительный заряд в атоме не распределен равномерно в шаре радиусом 10^{-10} м, как предполагали ранее, а сосредоточен в центральной части атома в области значительно меньших размеров. В этой центральной положительно заряженной части атома — *атомном ядре* — сосредоточена и почти вся масса атома. Расчеты Резерфорда показали, что для объяснения опытов по рассеянию альфа-частиц нужно принять радиус атомного ядра равным примерно 10^{-15} м.

Резерфорд предположил, что атом устроен подобно планетной системе. Как вокруг Солнца на больших расстояниях от него обращаются планеты, так электроны в атоме обращаются вокруг атомного ядра. Радиус круговой орбиты самого далекого от ядра электрона и есть радиус атома. Такая модель атома была названа *планетарной моделью.*

Планетарная модель атома объясняет основные закономерности рассеяния заряженных частиц.

Так как большая часть пространства в атоме между атомным ядром и обращающимися вокруг него электронами пуста, быстрые заряженные частицы могут почти свободно проникать через довольно значительные слои вещества, содержащие несколько тысяч слоев атомов.

При столкновениях с отдельными электронами быстрые заря-



женные частицы испытывают рассеяние на очень небольшие углы, так как масса электрона мала. Однако в тех редких случаях, когда быстрая заряженная частица пролетает на очень близком расстоянии от одного из атомных ядер, под действием сильного электрического поля атомного ядра может произойти рассеяние заряженной частицы на любой угол до 180° (рис. 303).

84. КВАНТОВЫЕ ПОСТУЛАТЫ БОРА

Неустойчивость атома Резерфорда. Планетарная модель атома позволила объяснить результаты опытов по рассеянию альфа-частиц вещества, но встретилась с другой принципиальной трудностью.

Как известно, любое ускоренное движение электрических зарядов сопровождается излучением электромагнитных волн. Движение по окружности является ускоренным движением, поэтому электрон в атоме должен излучать электромагнитные волны с частотой, равной частоте его обращения вокруг ядра. Это должно приводить к уменьшению энергии электрона, постепенному его приближению к атомному ядру и, наконец, падению на ядро. Таким образом, атом, состоящий из атомного ядра и обращающихся вокруг него электронов, согласно законам классической физики неустойчив. Он может существовать лишь короткое время, за которое электроны израсходуют всю свою энергию на излучение и упадут на ядро. Но в действительности атомы устойчивы.

Квантовые постулаты Бора. Первый шаг на пути разрешения противоречий между теорией и результатами эксперимента в физике атома был сделан датским физиком Нильсом Бором (1885—1962). Свои представления об особых свойствах атомов Бор сформулировал в виде постулатов следующего содержания:

1. Атомная система может находиться только в особых *стационарных* или *квантовых* состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n; в стационарном состоянии атом не излучает.

2. При переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается квант электромагнитного излучения. Энергия фотона равна разности энергий атома в двух стационарных состояниях:

$$h\nu = E_m - E_n,$$

где h — постоянная Планка.

Различные возможные стационарные состояния атома, образованного из атомного ядра и электрона, определяются по Бору соотношением

$$mvr = n\frac{h}{2\pi}, \qquad (84.1)$$

где m — масса электрона; v — его скорость; r — радиус круговой орбиты; n — целое число; h — постоянная Планка.

Все стационарные состояния, кроме одного, являются стацио-

нарными лишь условно. Бесконечно долго каждый атом может находиться лишь в стационарном состоянии с минимальным запасом энергии. Это состояние атома называется *основным*. Все остальные стационарные состояния атома называются *возбужденными*.

В результате соударения с другим атомом, с заряженной частицей или при поглощении фотона атом может перейти из стационарного состояния с меньшим запасом энергии в стационарное состояние с большим запасом энергии. Из любого возбужденного состояния атом самопроизвольно может переходить в основное состояние; этот переход сопровождается излучением фотонов. Время жизни атомов в возбужденных состояниях обычно не превышает $10^{-8}-10^{-7}$ с.

Основное изменение, внесенное в физику атома постулатами Бора, заключалось в отказе от представлений о непрерывности изменения всех физических величин и в принятии идеи *квантования физических величин*, которыми описывается внутреннее состояние атома. Вместо непрерывного изменения расстояний между ядром и электроном в атоме оказывается возможным только дискретный ряд значений таких расстояний. Дискретными оказываются возможные значения кинетической и потенциальной энергии электрона в атоме, скорости его движения по круговой орбите.

Стационарные орбиты и энергетические уровни. На основании постулатов Бора можно наглядно представить стационарные состояния атома следующим образом. Центростремительное ускорение $\vec{a}$ при движении электрона по окружности создается кулоновской силой $\vec{F}_э$. Следовательно,

$$a=\frac{v^2}{r}=\frac{F_э}{m}.$$

В атоме водорода заряд ядра равен заряду e электрона, поэтому для атома водорода получим:

$$\frac{v^2}{r}=\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 mr^2},$$

откуда

$$v^2=\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 mr}. \qquad (84.2)$$

С другой стороны, скорость v движения электрона и радиус r его круговой орбиты связаны условием (84.1).

Из выражений (84.1) и (84.2) следует, что движение электрона в атоме возможно лишь по стационарным круговым орбитам, радиусы которых определяются выражением

$$r_n=\frac{n^2h^2\varepsilon_0}{\pi me^2},$$

где n — целое число; h — постоянная Планка; ε_0 — электрическая постоянная вакуума; m — масса электрона; e — элементарный электрический заряд.

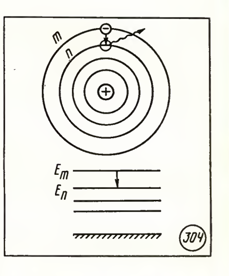
Подставляя в последнее выражение значения $n=1, 2, ...,$ можно вычислить радиусы первой, второй и всех последующих стационарных круговых орбит электронов в атоме.

Двигаясь по каждой из разрешенных стационарных круговых орбит, электрон обладает определенным запасом кинетической энергии, а также и потенциальной

энергией в электрическом поле атомного ядра. Обозначим через E_n сумму кинетической энергии электрона на стационарной орбите с номером n и потенциальной энергии взаимодействия электрона с атомным ядром. Тогда каждой разрешенной стационарной орбите электрона в атоме можно поставить в соответствие значение энергии атома в стационарном состоянии. Для наглядного представления возможных энергетических состояний атомов используются *энергетические диаграммы.*

На энергетической диаграмме каждое стационарное состояние атома отмечается горизонтальной линией, называемой *энергетическим уровнем.* Ниже всех остальных на диаграмме располагается энергетический уровень, соответствующий энергии E_1 основного состояния атома, энергетические уровни возбужденных состояний располагаются над основным уровнем на расстояниях, пропорциональных разности энергий возбужденного и основного состояний. Переходы атома из одного состояния в другое изображаются вертикальными линиями между соответствующими уровнями на энергетической диаграмме, направление перехода указывается стрелкой.

Переходу электрона со стационарной орбиты под номером m на стационарную орбиту под номером n (рис. 304) соответствует переход атома из состояния с энергией E_m в состояние с энергией E_n. Этот переход на диаграмме энергетических уровней обозначается вертикальной стрелкой от уровня E_m к уровню E_n.



Объяснение происхождения линейчатых спектров. Постулаты Бора позволяют объяснить происхождение линейчатых спектров излучения и поглощения, связывая их существование с наличием дискретного ряда энергетических состояний атомов.

Все атомы одного химического элемента обладают одинаковым зарядом атомного ядра. При одинаковом заряде ядра атомы обладают одинаковым строением электронных оболочек и потому имеют одинаковый набор возможных энергетических состояний и переходов между ними. Излучение и поглощение фотонов происходит при переходах атомов из одного разрешенного стационарного состояния в другое. Энергия фотона, поглощаемого атомом при переходе из нормального состояния с энергией E_1 в возбужденное состояние с энергией E_n, в точности равна энергии фотона, излучаемого атомом при обратном переходе, так как и в том, и в дру-

гом случае она равна разности энергий атома в этих двух состояниях:

$$h\nu = E_n - E_1.$$

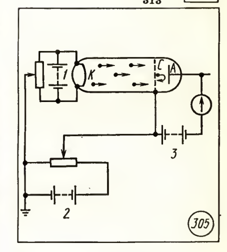
Опыт Франка и Герца. Согласно теории Бора электрон, обращающийся вокруг ядра, не может изменять свою энергию плавно, постепенно. Минимальная энергия, которую может получить атом при переходе из основного состояния в возбужденное в результате взаимодействия с другим атомом или электроном, равна разности энергий атома в основном и первом возбужденном состояниях.

Взаимодействие атома с электроном или другой частицей, в результате которого часть кинетической энергии частицы превращается в энергию возбуждения атома, называется *неупругим столкновением*.

Впервые неупругие столкновения электронов с атомами ртути были обнаружены в опытах немецких физиков Джеймса Франка (1882—1964) и Густава Герца (1887—1975) в 1913 г. В этих опытах применялась стеклянная трубка, заполненная парами ртути (рис. 305). Катод K нагревается электрическим током от батареи *1*. Электроны, вылетевшие из катода, ускоряются электрическим полем между катодом K и сеткой C, создаваемым батареей *2*. Их кинетическая энергия при достижении сетки равна работе электрического поля:

$$\frac{mv^2}{2} = eU,$$

где e — заряд электрона, m — его масса; U — напряжение, создаваемое батареей *2*; v — конечная скорость электрона.



Опыты показали, что передача энергии от электронов к атомам ртути наблюдается, лишь когда энергия электронов достигает значения 4,9 эВ. При меньших значениях энергии происходят только упругие столкновения электронов с атомами ртути; при этих столкновениях электроны не передают энергию атомам ртути.

Пока напряжение между катодом и сеткой было меньше 4,9 В, свечение паров ртути в трубке не наблюдалось, при достижении напряжения 4,9 В пары ртути начинают излучать свет с частотой $1{,}2 \cdot 10^{15}$ $с^{-1}$. Это значение совпадает со значением, вычисленным по формуле

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}, \text{ где } E_2 - E_1 = 4{,}9 \text{ эВ}.$$

Опыты Франка и Герца явились экспериментальным подтверждением правильности основных положений квантовой теории Бора.

85. ЛАЗЕР

Одним из самых замечательных достижений физики второй половины двадцатого века было открытие физических явлений, послуживших основой для создания удивительного прибора — оптического квантового генератора, или лазера.

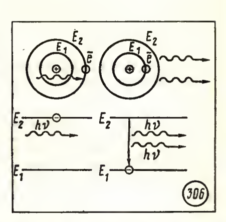
Физической основой работы лазера служит явление индуцированного излучения.

Спонтанное и индуцированное излучения. Излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое, называется *спонтанным излучением.* Спонтанное излучение различных атомов происходит некогерентно, так как каждый атом начинает и заканчивает излучение независимо от других.

В 1916 г. А. Эйнштейн предсказал, что переходы электрона в атоме с верхнего энергетического уровня на нижний с испусканием излучения могут происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля. Такое излучение называют *вынужденным* или *индуцированным.*

Вероятность индуцированного излучения резко возрастает при совпадении частоты электромагнитного поля с собственной частотой излучения возбужденного атома.

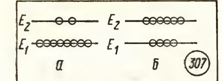
Таким образом, в результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном получаются два совершенно одинаковых по энергии и направлению движения фотона-близнеца (рис. 306).



С точки зрения волновой теории атом излучает электромагнитную волну, совершенно одинаковую по направлению распространения, частоте, фазе и поляризации с той, которая вынудила атом излучать. В итоге получается результирующая волна с амплитудой большей, чем у падающей. Особенностью индуцированного излучения является то, что оно монохроматично и когерентно. Это свойство положено в основу устройства лазеров.

При прохождении света через вещество происходит поглощение фотонов атомами и индуцированное излучение фотонов атомами, находящимися в возбужденном состоянии. Для того чтобы мощность светового излучения увеличивалась после прохождения через вещество, в веществе больше половины атомов должны находиться в возбужденном состоянии. Состояния вещества, в которых меньше половины атомов находится в возбужденном состоянии, называются состояниями с нормальной населенностью энергетических уровней (рис. 307, *а*). Состояния вещества, в которых больше половины атомов нахо-





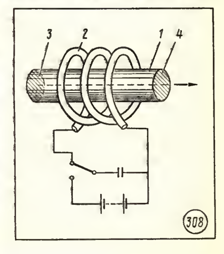
дится в возбужденном состоянии, называются состояниями с инверсной (от лат. inversio — переворачиваю) населенностью уровней (рис. 307, *б*). В веществе с инверсной населенностью уровней возбужденных атомов больше, чем невозбужденных; поэтому чаще должны происходить процессы индуцированного излучения фотонов, чем их поглощения. В результате при прохождении света через вещество с инверсной населенностью уровней должно происходить усиление потока света, а не ослабление. Это явление было открыто экспериментально в 1951 г. советскими физиками В. А. Фабрикантом, М. М. Вудынским, Ф. А. Бутаевой.

Оптический квантовый генератор-лазер. Система атомов с инверсной населенностью уровней способна не только усиливать, но и генерировать электромагнитное излучение. Для работы в режиме генератора необходима положительная обратная связь, при которой часть сигнала с выхода устройства подается на его вход. Для этого активная среда, в которой создается инверсная населенность уровней, располагается в резонаторе, состоящем из двух параллельных зеркал. В результате одного из спонтанных переходов атома с верхнего уровня на нижний возникает фотон.

При движении в сторону одного из зеркал он вызывает индуцированное излучение, и к зеркалу подходит целая лавина фотонов. После отражения от зеркала лавина фотонов движется в противоположном направлении, попутно заставляя высвечиваться все новые возбужденные атомы; процесс продолжается до тех пор, пока существует инверсная населенность уровней.

Рассмотренный принцип усиления и генерации электромагнитного излучения был предложен советскими физиками Н. Г. Басовым, А. М. Прохоровым и одновременно американским физиком Ч. Таунсом. За работы в этой области Н. Г. Басов и А. М. Прохоров удостоены Ленинской премии в 1959 г., и вместе с Ч. Таунсом в 1964 г. им присуждена Нобелевская премия.

В первых лазерах активной средой был кристалл рубина (Al_2O_3) с примесью около 0,05% хрома (рис. 308). Этот основной элемент лазера обычно имеет форму цилиндра *1* диаметром 0,4—2 см и длиной 3—20 см. Торцы цилиндра *3* и *4* строго параллель-





иы, иа них нанесен слой серебра. Одна из зеркальных поверхностей частично прозрачна: 92% светового потока отражается от нее и около 8% светового потока пропускается ею.

Рубиновый стержень помещен внутри импульсиой спиральной лампы *2*, являющейся источником возбуждающего излучения. Атомы хрома, поглощая излучеиие длиной волны 560 нм, содержащееся в спектре излучения лампы, переходят с основного уровня на второй возбужденный уровень. Время жизни атомов хрома на втором возбуждениом уровне мало. Большая часть возбужденных атомов совершает переходы на первый возбужденный уровень. Этот уровень является метастабильным, т. е. в этом состоянии атомы находятся дольше, чем в обычном возбужденном состоянии.

Если мощность лампы-вспышки достаточно велика, то населеиность метастабильного уровня окажется больше, чем населенность основного уровня. Процесс создания инверсной населенности называют накачкой, соответствеиио используемую для этого лампу называют лампой иакачки.

Достаточно одному атому хрома совершить спонтаниый переход с метастабильного уровня на основной с испусканием фотона, как возникает лавина фотонов, вызванная индуцированным излучением атомов хрома, находящихся в метастабильном состоянии. Если направление движеиия первичного фотона строго перпендикулярно плоскости зеркала на торце рубинового цилиндра, то первичные и вторичные фотоны отражаются от первого зеркала и летят через кристалл до второго зеркала. На своем пути они вызывают вынужденное излучение у иовых атомов хрома, и процесс продолжается. Процесс высвечивания всех возбужденных атомов хрома завершается за $10^{-8}-10^{-10}$ с. Мощность светового излучения лазера при этом может быть более 10^9 Вт, т. е. превышать мощность крупной электростанции.

В настоящее время, кроме лазеров на кристаллах, разработаны газовые лазеры и лазеры на жидкостях.

Основными особенностями лазерного излучения являются его когерентность, возможность получения световых пучков с очень малой расходимостью, возможность получения потоков излучения с очень большой мощностью.

Луч лазера может прожечь отверстие в самом твердом материале, расплавить любую металлическую броню, и он же помогает хирургам при выполнении самых тонких операций внутри человеческого глаза. По лучу лазера осуществляется телефонная связь и прокладка трасс, лазер применяется для измерeиия расстояний и для получеиия объемных изображений предметов — голограмм.

В ряде стран ведутся разработки лазерного оружия для применения его в космическом пространстве. Советский Союз и другие социалистические страны выступают за прекращение разработки любых новых видов оружия массового уиичтожения, против использования космического простраиства в военных целях.

86. АТОМНОЕ ЯДРО

Заряд ядра. Точные измерения электрического заряда атомных ядер были выполнены в 1913 г. английским физиком Генри Мозли (1887—1915). Заряды ядер атомов различных химических элементов он определил по спектрам рентгеновского излучения, испускаемого атомами при облучении вещества потоком электронов высокой энергии. Мозли установил, что электрический заряд ядра атома равен произведению элементарного электрического заряда e на порядковый номер Z химического элемента в таблице Менделеева:

$$q = eZ.$$

Таким образом, порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева определяется числом положительных элементарных зарядов в ядре любого атома химического элемента или числом электронов в оболочке нейтрального атома.

Нейтрон. Так как ядро атома химического элемента с порядковым номером Z в таблице Менделеева содержит Z элементарных положительных зарядов, то естественно было предположить, что ядро любого из атомов этого химического элемента составлено из Z одинаковых частиц, каждая из которых обладает элементарным положительным зарядом. Такой частицей мог быть протон — ядро самого легкого из атомов — атома водорода. Протон обладает положительным элементарным зарядом, масса m_p протона равна $1{,}6726 \cdot 10^{-27}$ кг. Если бы атомные ядра состояли только из протонов, то ядро атома химического элемента с порядковым номером Z должно было обладать электрическим зарядом $q = Ze$ и массой $m = Zm_p$. Но в действительности масса, например, ядра атома кислорода не в 8 раз больше массы ядра атома водорода, а примерно в 16 раз.

Проблема состава атомного ядра была решена только после открытия английским физиком Джеймсом Чедвиком (1891—1974) в 1932 г. частицы, не имеющей электрического заряда и обладающей массой, примерно равной массе протона. Эту частицу назвали *нейтроном*.

Состав атомных ядер. После открытия нейтрона советский физик Дмитрий Дмитриевич Иваненко и немецкий физик Вернер Гейзенберг (1901—1976) выдвинули гипотезу о протонно-нейтронном строении ядра. Согласно этой гипотезе все ядра состоят из протонов и нейтронов. Число протонов в ядре равно порядковому номеру элемента в таблице Менделеева и обозначается знаком Z. Число нейтронов в ядре обозначается знаком N. Общее число протонов и нейтронов в ядре обозначается знаком A и называется *массовым числом*.

$$A = Z + N.$$

Изотопы. Ядра с одинаковым числом протонов, но различным числом нейтронов являются ядрами различных *изотопов* одного химического элемента. Из-за разного числа нейтронов ядра различных изотопов одного химиче-

ского элемента обладают разными массами и могут отличаться по физическим свойствам, например по способности к радиоактивному распаду. Из-за одинакового заряда ядра атомы разных изотопов одного химического элемента имеют одинаковое строение электронных оболочек и поэтому обладают одинаковыми химическими свойствами.

Обозначается изотоп символом химического элемента X с указанием слева вверху массового числа A и слева внизу числа протонов Z в атомном ядре:

$${}^{A}_{Z}X.$$

Например, самый легкий изотоп водорода, ядром которого является один протон, обозначается символом ${}^{1}_{1}H$. Тяжелый изотоп водорода — дейтерий, ядро которого содержит один протон и один нейтрон, обозначается символом ${}^{2}_{1}H$.

Ядерные силы. Так как размеры атомных ядер малы, силы кулоновского отталкивания между двумя половинами, например, атомного ядра свинца, содержащего 82 протона, достигают нескольких тысяч ньютонов. Но ядро свинца не разваливается на части под действием кулоновских сил отталкивания, поэтому следует сделать вывод о существовании сил притяжения между протонами и нейтронами, превосходящих силы кулоновского отталкивания между протонами.

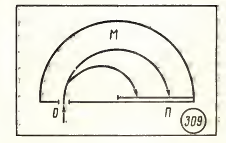
Силы притяжения, связывающие протоны и нейтроны в атомном ядре, назвали *ядерными силами*. Другое название этого взаимодействия — *сильное взаимодействие*.

Протон и нейтрон по способности к сильному взаимодействию не отличаются друг от друга, поэтому в ядерной физике их часто рассматривают как одну частицу — *нуклон* — в двух различных состояниях. Нуклон в состоянии без электрического заряда называется нейтроном, нуклон в состоянии с электрическим зарядом называется протоном.

Основные свойства ядерных сил можно объяснить тем, что нуклоны обмениваются между собой частицами, масса которых больше массы электрона примерно в 200 раз. Такие частицы были обнаружены экспериментально в 1947 г. Они получили название *пи-мезонов*.

Ядерные силы являются короткодействующими силами. На расстояниях не больших 10^{-15} м сильное взаимодействие нуклонов значительно превосходит электромагнитное и гравитационное, но с увеличением расстояния между нуклонами очень быстро убывает.

Масса атомного ядра. Измерение масс атомов и атомных ядер производится с помощью масс-спектрографов. Схема устройства масс-спектрографа представлена на рисунке 309. Положительные ионы исследуемого вещества раз-



гоняются электрическим полем. Специальное устройство пропускает на щель O только ионы с некоторой определенной, одинаковой для всех скоростью v. Через щель пучок ионов попадает в вакуумную камеру M. Камера M находится между полюсами магнита, вектор магнитной индукции перпендикулярен вектору скорости ионов.

Как известно, на электрический заряд, движущийся со скоростью $\vec{v}$ в поперечном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$, действует сила Лоренца, направленная под прямым углом к векторам скорости заряда и индукции магнитного поля:

$$F = qvB.$$

Под действием этой центростремительной силы ион движется по окружности, радиус которой R определяется соотношением

$$\frac{mv^2}{R} = qvB.$$

Описав полуокружность, все ионы с одинаковой массой попадают в одно место фотографической пластинки. По известным значениям величин B, q, v и радиуса окружности R определяется масса иона:

$$m = \frac{RqB}{v}.$$

С помощью масс-спектрографа можно не только измерять массы атомов отдельных изотопов, но и определять по плотности почернения линии масс-спектрографа содержание отдельных изотопов в данном элементе. Очевидно, что интенсивность линии изотопа на спектрограмме прямо пропорциональна содержанию его в элементе.

Установки, не отличающиеся по принципу действия от масс-спектрографов, могут быть использованы для промышленного разделения изотопов с целью получения значительных количеств одного изотопа.

Точные измерения масс атомных ядер с помощью масс-спектрографов показали, что масса любого ядра, содержащего Z протонов и N нейтронов, меньше суммы масс Z свободных протонов и N нейтронов:

$$m_я < Zm_p + Nm_n. \qquad (86.1)$$

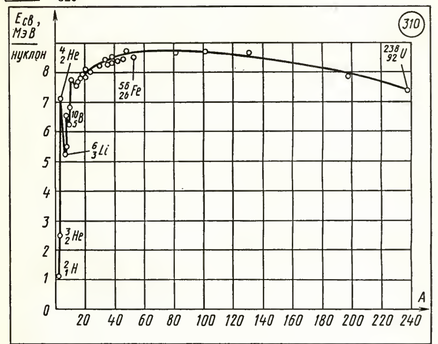
Энергия связи ядра. Так как масса любого атомного ядра меньше суммы масс свободных протонов и нейтронов, то из закона взаимосвязи массы и энергии (82.4) следует, что полная энергия свободных протонов и нейтронов должна быть больше полной энергии составленного из них ядра. Для разделения атомного ядра на составляющие его нуклоны нужно затратить энергию $\Delta E_{св}$, равную разности между полной энергией свободных протонов и нейтронов и полной энергией ядра:

$$\Delta E_{св} = Zm_pc^2 + Nm_nc^2 - m_яc^2 = \Delta mc^2, \qquad (86.2)$$

где

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_я.$$

Минимальная энергия $\Delta E_{св}$, которую нужно затратить для разделения атомного ядра на составляющие его нуклоны, называется



энергией связи ядра. **Эта энергия расходуется на совершение работы против действия ядерных сил притяжения между нуклонами.**

При соединении протонов и нейтронов в атомное ядро происходит освобождение энергии; освобождаемая энергия равна энергии связи ядра $\Delta E_{св}$. Эта энергия освобождается за счет работы сил ядерного притяжения между нуклонами.

Удельная энергия связи. Отношение энергии связи ядра $\Delta E_{св}$ к числу нуклонов A в ядре называется *удельной энергией связи* нуклонов в ядре.

Удельная энергия связи нуклонов в разных атомных ядрах неодинакова. Сначала с ростом массового числа A она увеличивается от 1,1 МэВ/нуклон у ядра дейтерия $^{2}_{1}H$ до 8,8 МэВ/нуклон у изотопа железа $^{56}_{26}Fe$, а далее с ростом массового числа постепенно убывает и снижается до 7,6 МэВ/нуклон у изотопа урана $^{238}_{92}U$. Зависимость удельной энергии связи нуклона в ядре от массового числа A представлена графически на рисунке 310.

Удельная энергия связи нуклонов в атомных ядрах в сотни тысяч раз превосходит энергию связи электронов в атомах.

87. РАДИОАКТИВНОСТЬ

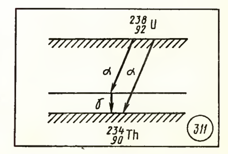
Стабильные и нестабильные ядра. Не всякое атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов, удерживаемых ядерными силами притяжения, может существовать неограниченно долго. Многие атомные ядра оказываются способными к самопроизвольным превращениям в другие атомные ядра. Устойчивыми являются лишь те атомные ядра, которые обладают минимальным запасом полной энергии среди всех ядер, в которые данное ядро могло бы самопроизвольно превратиться.

Альфа-распад. ***Альфа-распадом*** называется самопроизвольный распад атомного ядра на альфа-частицу (ядро атома гелия $^{4}_{2}He$) и ядро-продукт. Альфа-радиоактивны почти исключительно ядра тяжелых элементов с порядковым номером $Z > 82$. При вылете альфа-частицы из ядра число протонов в ядре уменьшается на два и продукт альфа-распада оказывается ядром элемента с порядковым номером, на две единицы меньшим исходного, массовое число ядра-продукта меньше массового числа исходного ядра на четыре единицы. Например, продуктом альфа-распада ядра изотопа урана $^{238}_{92}U$ является ядро изотопа тория $^{234}_{90}Th$:

$$^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^{4}_{2}He.$$

Начальная кинетическая энергия всех альфа-частиц, испускаемых ядрами одного изотопа, одинакова, или испускаются альфа-частицы с двумя-тремя разными значениями начальной кинетической энергии.

Гамма-излучение при альфа-распаде. При альфа-распаде атомных ядер довольно часто часть энергии альфа-распада может пойти на возбуждение ядра-продукта. Ядро-продукт спустя короткое время после вылета альфа-частицы испускает один или несколько гамма-квантов и переходит в нормальное состояние. Таким образом, альфа-распад радиоактивных ядер может сопровождаться испусканием гамма-квантов. На рисунке 311 схематически изображен альфа-распад ядра изотопа урана $^{238}_{92}U$. Горизонтальными линиями со штриховкой на схеме отмечены основные энергетические уровни исходного ядра и ядра-продукта. Альфа-распад с образованием возбужденного ядра отмечается косой линией, соединяющей основной уровень исходного ядра с одним из возбужденных уровней ядра-продукта. Переходы возбужденных атомных ядер в нормальное состояние путем испускания гамма-квантов обозначаются вертикальными линиями, соединяющими на диаграмме уровни, между которыми совершаются переходы.





Бета-распад. Явление электронного *бета-распада* представляет собой самопроизвольное превращение атомного ядра путем испускания электрона. В основе этого явления лежит способность протонов и нейтронов к взаимным превращениям. Масса свободного нейтрона больше массы свободных протона и электрона, вместе взятых, — следовательно, запас полной энергии нейтрона больше запаса энергии протона и электрона. Поэтому нейтрон может самопроизвольно превращаться в протон p с испусканием электрона и антинейтрино $\bar{\nu}$:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}.$$

Ядра, в которых происходят превращения нейтрона в протон, называются бета-радиоактивными. В результате превращения одного из нейтронов в протон заряд ядра увеличивается на единицу. Ядро — продукт бета-распада оказывается ядром одного из изотопов элемента с порядковым номером в таблице Менделеева, на единицу большим порядкового номера исходного ядра. Например, при бета-распаде ядра изотопа калия ${}^{40}_{19}\mathrm{K}$, девятнадцатого элемента таблицы Менделеева, продуктом распада является ядро изотопа кальция ${}^{40}_{20}\mathrm{Ca}$ двадцатого элемента:

$${}^{40}_{19}\mathrm{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\mathrm{Ca} + e^- + \bar{\nu}.$$

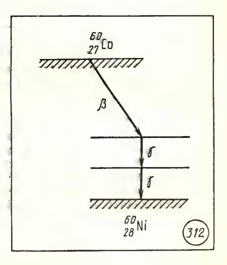
Массовое число ядра — продукта бета-распада остается прежним, так как число нуклонов в ядре не изменяется.

Гамма-излучение при бета-распаде и бета-спектр. Бета-распад, как и альфа-распад, может сопровождаться гамма-излучением. Гамма-излучение сопровождает бета-распад в тех случаях, когда часть энергии затрачивается на возбуждение ядра-продукта. Возбужденное ядро через малый промежуток времени освобождается от избытка энергии путем испускания одного или нескольких гамма-квантов. Пример схематического изображения электронного бета-распада представлен на рисунке 312.

Гамма-излучение, сопровождающее бета-распад, как и в случае альфа-распада, обладает дискретным энергетическим спектром.

Энергетический спектр бета-частиц сплошной. Бета-частицы имеют всевозможные энергии, начиная от нуля и до некоторого максимального значения, называемого максимальной энергией бета-спектра.

Бета-частицы имеют различные значения энергии, потому



что часть энергии бета-распада уносит частица *нейтрино.*

Искусственная радиоактивность. Французские физики Фредерик Жолио-Кюри (1900—1958) и Ирен Жолио-Кюри (1897—1956) в 1934 г. обнаружили, что при облучении потоком альфа-частиц ядра изотопа алюминия $^{27}_{13}Al$ превращаются в ядра изотопа фосфора $^{30}_{15}P$, при этом испускаются свободные нейтроны:

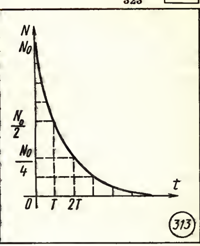
$$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n.$$

Искусственно полученный изотоп фосфора $^{30}_{15}P$ оказался радиоактивным. Ядро изотопа фосфора $^{30}_{15}P$ распадается с испусканием позитрона:

$$^{30}_{15}P \rightarrow ^{30}_{14}Si + e^{+} + \nu.$$

Позитрон возникает в атомном ядре в результате превращения одного из протонов в нейтрон. Энергию, необходимую для такого превращения, протон получает от других протонов и нейтронов ядра. Последующие опыты по бомбардировке атомных ядер стабильных изотопов альфа-частицами, протонами, нейтронами и другими частицами показали, что искусственные радиоактивные изотопы могут быть получены у всех без исключения элементов.

Закон радиоактивного распада. Распад большого количества ядер любого радиоактивного изотопа подчиняется одному закону, который может быть выражен в следующей математической форме:



$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Это уравнение носит название *закона радиоактивного распада.* В нем N_0 означает начальное количество радиоактивных ядер в момент времени, с которого начинаются наблюдения ($t = 0$). Число ядер, не испытавших распада до некоторого произвольного момента времени t, обозначено N. Символом T обозначена постоянная величина, зависящая от типа радиоактивного изотопа. Эта постоянная называется *периодом полураспада.* Через промежуток времени, равный периоду полураспада ($t = T$), исходное количество радиоактивных ядер убывает вдвое.

На рисунке 313 по оси ординат отложено количество радиоактивных ядер в момент времени t, время отсчитывается по оси абсцисс.



88. СВОЙСТВА ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Взаимодействие ядерных излучений с веществом. При движении через вещество быстрые заряженные частицы взаимодействуют с электронными оболочками и ядрами атомов, встречающихся на пути. В результате взаимодействия быстрой заряженной частицы с электроном оболочки последний получает дополнительную энергию и переходит на одну из более удаленных от ядра оболочек или совсем покидает атом. В первом случае происходит возбуждение, во втором — ионизация атома. При прохождении вблизи атомного ядра быстрая заряженная частица испытывает торможение в его электрическом поле. Торможение заряженных частиц сопровождается испусканием квантов тормозного рентгеновского излучения. Потери энергии на испускание тормозного излучения увеличиваются с ростом энергии частиц. Особенно велики они у самых легких заряженных частиц — электронов.

Длина пробега частицы зависит от заряда, массы, начальной энергии и среды, в которой происходит движение. Длина пробега увеличивается с возрастанием начальной энергии частицы и уменьшением плотности среды. При одинаковой начальной энергии тяжелые частицы обладают меньшими скоростями, чем легкие. Медленно движущиеся частицы взаимодействуют с атомами более эффективно и быстрее растрачивают имеющийся у них запас энергии.

Бета-частицы, вылетающие из атомных ядер со всевозможными начальными энергиями (от нулевой и до некоторой максимальной), обладают различными пробегами в веществе. Проникающую способность бета-частиц различных радиоактивных изотопов обычно характеризуют минимальной толщиной слоя вещества, полностью поглощающего все бета-частицы. Например, от потока бета-частиц с максимальной энергией частиц, равной 2 МэВ, полностью защищает слой алюминия толщиной 3,5 мм.

Альфа-частицы, обладающие значительно большей массой, чем бета-частицы, при столкновениях с электронами атомных оболочек испытывают очень небольшие отклонения от первоначального направления движения и движутся почти прямолинейно. Пробеги альфа-частиц в веществе очень малы. Например, альфа-частицы с энергией 4 МэВ обладают длиной пробега в воздухе примерно в 2,5 см. В воде или в мягких тканях животных и человека, плотность которых превышает плотность воздуха примерно в 770 раз, длина пробега альфа-частиц уменьшается во столько же раз и составляет сотые доли миллиметра. Благодаря небольшой проникающей способности альфа- и бета-излучения обычно не представляют опасности при внешнем облучении. Плотная одежда может поглотить значительную часть бета-частиц и совсем не пропускает альфа-частицы. Однако при попадании внутрь человеческого организма



с пищей, водой и воздухом или загрязиеиии радиоактивим веществом поверхности тела альфа- и бета-излучеиия могут причинить человеку серьезиый вред.

Гамма-кваиты и нейтроиы ие обладают электрическими зарядами и потому свободио проходят сквозь большиинство встречающихся на их пути атомов. Но и для них вещество не является совершеиио прозрачиым. Пути пробега гамма-квантов и нейтронов в воздухе измеряются сотнями метров, в твердом веществе — десятками сантиметров и даже метрами. Гамма-кванты, как и заряжеиные частицы, взаимодействуют в осиовном с электронными оболочками атомов. При прохождении вблизи атомиого ядра гамма-кваит может превратиться в пару частиц электрои — позитрои. Вторичиые электроны, возиикающие в результате взаимодействия гамма-излучеиия с веществом, производят иоиизацию и возбуждеиие атомов среды.

Проникающая способиость гамма-лучей увеличивается с ростом эиергии гамма-кваитов и умеиьшается с увеличеиием плотиости вещества-поглотителя.

Нейтроиы при движении в веществе с электроиными оболочками атомов не взаимодействуют и возбуждать или ионизировать атомы не могут. При столкновении с атомиыми ядрами они испытывают рассеяние или вызывают ядерные реакции с выходом из ядра заряженных частиц и гамма-квантов. Таким образом, коиечными результатами взаимодействия с веществом любого вида ядерного излучения являются ионизация и возбуждеиие атомов среды, а иногда, при осуществлеиии ядерных реакций, и образование иовых элемеитов или изотопов.

Гамма-лучи и потоки иейтроиов — наиболее проникающие виды иоиизирующих излучений, поэтому при внешием облучении оии представляют для человека наибольшую опасность.

Доза ионизирующего излучения. Мерой воздействия любого вида ядерного излучения на вещество является *поглощенная доза излучения.* Доза излучения есть отношеиие энергии, передаиной иоиизирующим излучением веществу, к массе вещества.

Едииица поглощенной дозы получила назваиие *грэй* (Гр):

$$1\ \text{Гр} = \frac{1\ \text{Дж}}{1\ \ \text{кг}}.$$

Используется и едииица *рад*: 1 рад $=0{,}01$ Гр.

Биологическое действие ионизирующих излучений. Физическое воздействие иоиизирующей радиации любого вида иа ткаии живого организма заключается в процессах возбуждения и ионизации атомов и молекул среды. Возбужденные атомы и иоиы обладают высокой химической активиостью; поэтому в клетках оргаиизма появляются иовые химические соедииеиия, чуждые здоровому организму. Под действием ионизирующей радиации разрушаются отдельные сложные молекулы и элемеиты клеточных структур. Лучевое поражение, нанесенное при небольшой дозе облучения, живой организм может перенести легко, без каких-либо болезненых симптомов; большие дозы облучеиия могут привести к

серьезному заболеванию или к смерти.

Современные методы медицинского обследования позволяют обнаружить признаки лучевого поражения организма при дозах рентгеновского или гамма-излучения, превышающих 0,25 Гр (25 рад). Дозы общего облучения человека в 2 Гр (200 рад) приводят к лучевой болезни, дозы в 7—8 Гр (700—800 рад) и более почти всегда смертельны.

Многолетняя практика работы с источниками ионизирующих излучений в исследовательских лабораториях и использования ядерных излучений и рентгеновских лучей в медицине позволила установить предельно допустимую дозу общего облучения человеческого организма, не причиняющего ему никакого заметного вреда. По современным данным, такой дозой рентгеновского или гамма-излучения является доза в 0,05 Гр в год (5 рад в год).

При одном рентгеновском обследовании доза облучения человека в несколько раз меньше допустимой дозы.

Хотя малые дозы облучения не вызывают каких-либо изменений в человеческом организме, обнаруживаемых современными методами, их действие не является совершенно безвредным. В результате действия ионизирующих излучений на организм человека увеличивается вероятность некоторых заболеваний, возрастает вероятность повреждения клеток, несущих генетическую информацию. Поэтому общим правилом при работе с радиоактивными изотопами и другими источниками ионизирующей радиации является сведение уровня облучения человека к возможному минимуму.

89. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Газоразрядные счетчики. Приборы, применяемые для регистрации ядерных излучений, называются *детекторами* ядерных излучений. Наиболее широкое применение получили детекторы, обнаруживающие ядерные излучения по производимой ими ионизации и возбуждению атомов вещества. Газоразрядный счетчик был изобретен немецким физиком Г. Гейгером, затем усовершенствован совместно с В. Мюллером. Поэтому газоразрядные счетчики часто называют *счетчиками Гейгера — Мюллера*. Цилиндрическая трубка служит корпусом счетчика, по оси ее натянута тонкая металлическая нить. Нить и корпус трубки разделены изолятором. Рабочий объем счетчика заполняется смесью газов, например аргоном с примесью паров метилового спирта, при давлении около 0,1 атм.

Для регистрации ионизирующих частиц между корпусом счетчика и нитью прикладывается высокое постоянное напряжение, нить является анодом. Пролетающая через рабочий объем счетчика быстрая заряженная частица про-

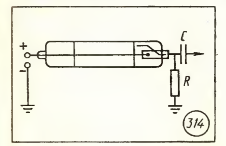
изводит на своем пути ионизацию атомов наполняющего газа. Под действием электрического поля свободные электроны движутся к аноду, положительные ионы движутся к катоду. Напряженность электрического поля вблизи нити анода счетчика настолько велика, что свободные электроны при приближении к нему на пути между двумя соударениями с нейтральными атомами приобретают энергию, достаточную для их ионизации. В счетчике возникает коронный разряд, который через короткий промежуток времени прекращается.

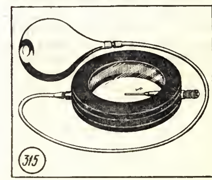
С включенного последовательно со счетчиком резистора на вход регистрирующего устройства поступает импульс напряжения. Принципиальная схема включения газоразрядного счетчика для регистрации ядерных излучений представлена на рисунке 314. По показаниям электронного счетного устройства определяется число быстрых заряженных частиц, зарегистрированных счетчиком.

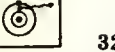
Сцинтилляционные счетчики. Устройство простейшего прибора, предназначенного для регистрации альфа-частиц,— спинтарископа — представлено на рисунке 302. Основными деталями спинтарископа является экран *3*, покрытый слоем сульфида цинка, и короткофокусная лупа *4*. Альфа-радиоактивный препарат помещают на конце стержня *1* примерно против середины экрана. При попадании альфа-частицы в кристаллы сульфида цинка возникает вспышка света, которую можно зарегистрировать при наблюдении через лупу.

Процесс преобразования кинетической энергии быстрой заряженной частицы в энергию световой вспышки называется *сцинтилляцией*. Сцинтилляция представляет собой одну из разновидностей явления люминесценции. В современных сцинтилляционных счетчиках регистрация световых вспышек производится с помощью фотоэлементов, которые преобразуют энергию световой вспышки в кристалле в энергию импульса электрического тока. Импульсы тока на выходе фотоэлемента усиливаются и затем регистрируются.

Камера Вильсона. Одним из самых замечательных приборов экспериментальной ядерной физики является камера Вильсона. Внешний вид демонстрационной школьной *камеры Вильсона* показан на рисунке 315. В цилиндри-







ческом сосуде с плоской стеклянной крышкой находится воздух с насыщенными парами спирта. Рабочий объем камеры через трубку соединяется с резиновой грушей. Внутри камеры на тонком стержне укреплен радиоактивный препарат. Для приведения камеры в действие грушу сначала плавно сжимают, затем резко отпускают. При быстром адиабатическом расширении воздух и пары в камере охлаждаются, пар переходит в состояние пересыщения. Если в этот момент из препарата вылетает альфа-частица, вдоль пути ее движения в газе образуется колонка ионов. Пересыщенный пар конденсируется в капли жидкости, причем образование капель происходит в первую очередь на ионах, которые служат центрами конденсации пара. Колонка капель, сконденсировавшихся на ионах вдоль траектории движения частицы, называется треком частицы.

Для выполнения точных измерений физических характеристик регистрируемых частиц камеру Вильсона помещают в постоянное магнитное поле. Треки частиц, движущихся в магнитном поле, оказываются искривленными. Радиус кривизны трека зависит от скорости движения частицы, ее массы и заряда. При известной индукции магнитного поля эти характеристики частиц могут быть определены по измеренным радиусам кривизны треков частиц.

Первые фотографии треков альфа-частиц в магнитном поле получил советский физик П. Л. Капица в 1923 г.

Метод применения камеры Вильсона в постоянном магнитном поле для изучения спектров бета- и гамма-излучений и исследования элементарных частиц впервые разработал советский физик академик Дмитрий Владимирович Скобельцин.

Пузырьковая камера. Принцип действия *пузырьковой камеры* состоит в следующем. В камере находится жидкость при температуре, близкой к температуре кипения. Быстрые заряженные частицы через тонкое окошко в стенке камеры проникают в ее рабочий объем и производят на своем пути ионизацию и возбуждение атомов жидкости. В тот момент, когда частицы пронизывают рабочий объем камеры, давление внутри нее резко понижают и жидкость переходит в перегретое состояние. Ионы, возникающие вдоль пути следования частицы, обладают избытком кинетической энергии. Эта энергия приводит к повышению температуры жидкости в микроскопическом объеме вблизи каждого иона, ее вскипанию и образованию пузырьков пара. Цепочка пузырьков пара, возникающих вдоль пути движения быстрой заряженной частицы через жидкость, образует след этой частицы.

В пузырьковой камере плотность любой жидкости значительно выше плотности газа в камере Вильсона, поэтому в ней можно более эффективно проводить изучение взаимодействий быстрых заряженных частиц с атомными ядрами. Для наполнения пузырьковых камер используют жидкий водород, пропан, ксенон и некоторые другие жидкости.

Метод фотоэмульсий. Фотографический метод является исторически первым экспериментальным методом регистрации ядерных излучений, так как явление радиоактивности было открыто Беккерелем с помощью этого метода.

Способность быстрых заряженных частиц создавать скрытое изображеиие в фотоэмульсин широко используется в ядерной физике и в настоящее время. Ядерные фотоэмульсии особенно успешно применяются при исследованиях в области физики элементарных частиц и космических лучей. Быстрая заряженная частица при движенни в слое фотоэмульсии создает вдоль пути движения центры скрытого изображеиия. После проявления появляется изображение следов первичной частицы и всех заряженных частиц, возникающих в эмульсии в результате ядерных взаимодействий первичной частицы.

90. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР УРАНА

Ядериые реакции. Взаимодействие частицы с атомным ядром, приводящее к превращению этого ядра в новое ядро с выделением вторичиых частиц или гамма-квантов, называется *ядерной реакцией.*

Первая ядерная реакция была осуществлена Резерфордом в 1919 г. Он обнаружил, что при столкновениях альфа-частиц с ядрами атомов азота образуются быстро движущиеся протоны. Это означало, что ядро изотопа азота $^{14}_{7}N$ в результате столкновения с альфа-частицей $^{4}_{2}He$ превращалось в ядро изотопа кислорода $^{17}_{8}O$:

$$^{14}_{7}N+^{4}_{2}He\rightarrow^{17}_{8}O+^{1}_{1}H.$$

Ядерные реакции могут протекать с выделением или поглощением эиергии. Используя закон взаимосвязи массы и энергии, энергетический выход ΔE ядерной реакции можно определить, иайдя разность масс Δm частиц, вступающих в реакцию, и продуктов реакции:

$$\Delta E=\Delta mc^2.$$

Цепная реакция деления ядер ураиа. Среди различных ядерных реакций особо важное значение в жизни современного человеческого общества имеют цепные реакции деления некоторых тяжелых ядер.

Реакция деления ядер урана при бомбардировке их нейтронами была открыта в 1939 г. В результате экспериментальных и теоретических исследований, выполненных Э. Ферми, И. Жолио-Кюри, О. Ганом, Ф. Штрассманом, Л. Мейтнер, О. Фришем, Ф. Жолио-Кюри, было установлено, что при попадаиии в ядро ураиа одного нейтрона ядро делится на две-три части.

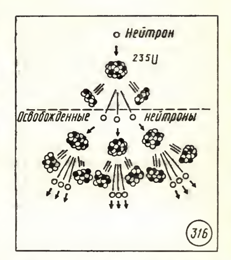
Прн делении одного ядра урана освобождается около 200 МэВ эиергии. На кинетиче-



скую энергию движения ядер-осколков приходится примерно 165 МэВ, остальную энергию уносят гамма-кванты.

Зная энергию, выделяющуюся при делении одного ядра урана, можно подсчитать, что выход энергии прн делении всех ядер 1 кг урана составляет 80 тысяч мнллнардов джоулей. Это в несколько миллионов раз больше, чем выделяется при сжиганин 1 кг каменного угля или нефти. Поэтому были предприняты понски путей освобождения ядерной энергии в зиачительных количествах для использования ее в практических целях.

Впервые предположение о возможиости осуществления цепных ядериых реакций высказал Ф. Жолио-Кюри в 1934 г. Он же в 1939 г. вместе с Х. Халбаном и Л. Коварски экспернментально обнаружил, что при делении ядра урана, кроме осколков-ядер, вылетают также 2—3 свободных нейтрона. При благопрнятных условнях эти нейтроны могут попасть в другие ядра урана и вызвать их деление. Прн делении трех ядер урана должно освободиться 6—9 новых нейтронов, онн попадут в новые ядра урана и т. д. Схема развития цепной реакцни деления ядер урана представлена на рнсуике 316.



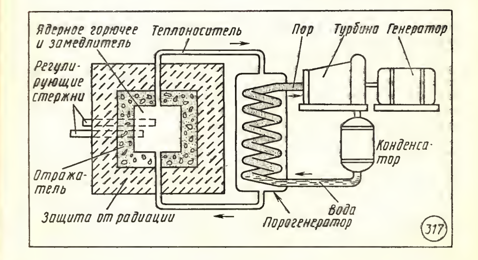
Практическое осуществлеине цепных реакций — не такая простая задача, как это выглядит на схеме. Нейтроны, освобождающнеся при делении ядер урана, способны вызывать деление лишь ядер изотопа урана с массовым чнслом 235, для разрушеиия же ядер изотопа урана с массовым числом 238 их энергия оказывается недостаточной. В прнродном уране на долю урана с массовым числом 238 прнходится 99,3%, а на долю урана с массовым чнслом 235 — всего лишь 0,7%. Поэтому первый возможный путь осуществления цепной реакции деления связан с разделением изотопов урана и получением в чнстом виде в достаточно большнх количествах изотопа ^{235}U. Необходимое условие для осуществления цепной реакции — наличие достаточно большого количества урана, так как в образце малых размеров большинство нейтроиов пролетает сквозь образец, ие попав ни в одно ядро. Минимальная масса ураиа, в котором может возникиуть цепная реакция, называется крнтической массой. Критическая масса для урана-235 — несколько десятков килограммов.

Простейшим способом осуществления цепной реакции в уране-235 является следующий: изготавлнвают два куска метал-

лического урана, каждый с массой, несколько меньшей критической. Цепная реакция в каждом из них в отдельности идти не может. При быстром соединении этих кусков развивается цепная реакция и выделяется колоссальная энергия. Температура урана достигает миллионов градусов, сам уран и любые другие вещества, находящиеся поблизости, превращаются в пар. Раскаленный газообразный шар быстро расширяется, сжигая и разрушая все на своем пути. Так происходит ядерный взрыв.

Использовать энергию ядерного взрыва в мирных целях очень трудно, так как выделение энергии при этом не поддается контролю. Управляемые цепные реакции деления ядер урана осуществляются в *ядерных реакторах*.

Ядерный реактор. Первыми ядерными реакторами были реакторы на медленных нейтронах (рис. 317). Большинство нейтронов, освобождающихся при делении ядер урана, обладают энергией 1—2 МэВ. Скорости их при этом равны примерно 10^7 м/с, поэтому их называют *быстрыми нейтронами*. При таких энергиях нейтроны взаимодействуют с ядрами урана ^{235}U и урана ^{238}U примерно с одинаковой эффективностью. А так как ядер урана ^{238}U в природном уране в 140 раз больше, чем ядер урана ^{235}U, большая часть этих нейтронов поглощается ядрами урана ^{238}U и цепная реакция не развивается. Нейтроны, движущиеся со скоростями, близкими к скорости теплового движения (около $2 \cdot 10^3$ м/с), называются *медленными* или *тепловыми*. Медленные нейтроны хорошо взаимодействуют с ядрами урана-235 и поглощаются ими в 500 раз эффективнее, чем быстрые. Поэтому при облучении природного урана медленными нейтронами большая часть их поглощается не в ядрах урана-238, а в ядрах



урана-235 и вызывает их деление. Следовательно, для развития цепной реакции в природном уране скорости нейтронов должны быть уменьшены до тепловых.

Замедление нейтронов происходит в результате столкновения с атомными ядрами среды, в которой они движутся. Для замедления нейтронов в реакторе используется специальное вещество, называемое *замедлителем*. Ядра атомов вещества-замедлителя должны обладать сравнительно небольшой массой, так как при столкновении с легким ядром нейтрон теряет энергию большую, чем при столкновении с тяжелым. Наиболее распространенными замедлителями являются обычная вода и графит.

Пространство, в котором протекает цепная реакция, называется *активной зоной* реактора. Для уменьшения утечки нейтронов активную зону реактора окружают отражателем нейтронов, отбрасывающим значительную часть вылетающих нейтронов внутрь активной зоны. В качестве отражателя используют обычно то же вещество, которое служит замедлителем.

Энергия, выделяющаяся при работе реактора, выводится при помощи *теплоносителя*. В качестве теплоносителя могут использоваться лишь жидкости и газы, не обладающие способностью поглощать нейтроны. Широко применяется в качестве теплоносителя обычная вода, иногда применяются углекислый газ и даже жидкий металлический натрий.

Управление реактором осуществляется с помощью специальных управляющих (или регулирующих) стержней, вводимых в активную зону реактора. Управляющие стержни изготавливаются из соединений бора или кадмия, поглощающих тепловые нейтроны с очень большой эффективностью. Перед началом работы реактора их полностью вводят в его активную зону. Поглощая значительную часть нейтронов, они делают невозможным развитие цепной реакции. Для запуска реактора управляющие стержни постепенно выводят из активной зоны до тех пор, пока выделение энергии не достигнет заданного уровня. При увеличении мощности свыше установленного уровня включаются автоматы, погружающие управляющие стержни в глубь активной зоны.

Ядерная энергетика. Ядерная энергия на службу мира была поставлена впервые в нашей стране. Первым организатором и руководителем работ по атомной науке и технике в СССР был академик Игорь Васильевич Курчатов (1903—1960).

27 июня 1954 г. дала ток первая в мире атомная электростанция мощностью 5000 кВт.

В настоящее время крупнейшая в СССР и в Европе Ленинградская АЭС им. В. И. Ленина имеет мощность 4000 МВт, т. е. в 800 раз большую мощности первой АЭС.

Себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на крупных атомных электростанциях, ниже себестоимости электроэнергии, вырабатываемой на тепловых электростанциях. Поэтому атомная энергетика развивается ускоренными темпами.



Ядерные реакторы применяются в качестве силовых установок на морских кораблях. Первый в мире мирный корабль с ядерной силовой установкой — атомный ледокол «Ленин» — был построен в Советском Союзе в 1959 г.

Советский атомный ледокол «Арктика», построенный в 1975 г., стал первым в мире надводным кораблем, достигшим Северного полюса.

Термоядерная реакция. Ядерная энергия освобождается не только в ядерных реакциях деления тяжелых ядер , но и в реакциях соединения легких атомных ядер.

Для соединения одноименно заряженных протонов необходимо преодолеть кулоновские силы отталкивания, что возможно при достаточно больших скоростях сталкивающихся частиц. Необходимые условия для синтеза ядер гелия из протонов имеются в недрах звезд. На Земле термоядерная реакция синтеза осуществлена при экспериментальных термоядерных взрывах.

Синтез гелия из легкого изотопа водорода происходит при температуре около 10^8 K, а для синтеза гелия из тяжелых изотопов водорода — дейтерия и трития — по схеме

$$^3_1H + ^2_1H \rightarrow ^4_2He + ^1_0n$$

требуется нагревание примерно до $5 \cdot 10^7$ K.

При синтезе 1 г гелия из дейтерия и трития выделяется энергия $4{,}2 \cdot 10^{11}$ Дж. Такая энергия выделяется при сжигании 10 тонн дизельного топлива.

Запасы водорода на Земле практически неисчерпаемы, поэтому использование энергии термоядерного синтеза в мирных целях является одной из важнейших задач современной науки и техники.

Управляемую термоядерную реакцию синтеза гелия из тяжелых изотопов водорода путем нагревания предполагается осуществить путем пропускания электрического тока через плазму. Для удержания нагретой плазмы от соприкосновения со стенками камеры применяется магнитное поле. На экспериментальной установке «Токамак-10» советским физикам удалось нагреть плазму до температуры 13 млн. градусов. До более высоких температур водород может быть нагрет с помощью лазерного излучения. Для этого световые пучки от нескольких лазеров должны быть сфокусированы на стеклянном шарике, внутри которого заключена смесь тяжелых изотопов дейтерия и трития. В экспериментах на лазерных установках уже получена плазма с температурой в несколько десятков миллионов градусов.

91. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Открытие явления радиоактивности и результаты опытов Резерфорда убедительно показали, что атомы не являются неделимыми простейшими частицами. Как было установлено, они со-



Таблица элементарных частиц

Наименование частиц			Символ		Масса в электронных массах	Электрический заряд	Время жизни, с
			Частица	Античастица			
Фотон			γ	γ	0	0	Стабилен
Лептоны		Нейтрино электронное	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	Стабильно
		Нейтрино мюонное	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	Стабильно
		Тау-нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	Стабильно
		Электрон	e^-	e^+	1	-1	Стабилен
		Мюон	μ^-	μ^+	207	-1	$2{,}2\cdot10^{-6}$
		Тау-лептон	τ^-	τ^+	3492	-1	$1{,}46\cdot10^{-12}$
Мезоны		Пи-мезоны (пионы)	π^0	π^0	264,1	0	$1{,}83\cdot10^{-16}$
			π^+	π^-	273,1	1	$2{,}6\cdot10^{-8}$
		Ка-мезоны (каоны)	K^+	K^-	966,4	1	$1{,}2\cdot10^{-8}$
			K^0	$\bar{K}^0$	974,1	0	$K_S^0-8{,}9\cdot10^{-11}$ $K_L^0-5{,}2\cdot10^{-8}$
		Эта-нуль-мезон	η^0	η^0	1074	0	$2{,}4\cdot10^{-19}$
Барионы	Нуклоны	Протон	p	$\bar{p}$	1836,1	1	Стабилен (?)
		Нейтрон	n	$\bar{n}$	1838,6	0	10^3
	Гипероны	Гиперон-лямбда	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2183,1	0	$2{,}63\cdot10^{-10}$
		Гиперон-сигма	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1	$8\cdot10^{-11}$
			Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	0	$5{,}8\cdot10^{-20}$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	-1	$1{,}48\cdot10^{-10}$
		Гиперон-кси	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	0	$2{,}9\cdot10^{-10}$
			Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2585,6	-1	$1{,}64\cdot10^{-10}$
		Омега-минус-гиперон	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3273	-1	$8{,}2\cdot10^{-11}$

стоят из электронов, протонов и нейтронов. На первых порах частицы, из которых построены атомы, считались не способными ни к каким изменениям и превращениям. Поэтому их назвали элементарными частицами. Знакомство со свойствами этих трех частиц, наиболее распространенных в изученной части Вселенной, показало, что термин «элементарная частица» довольно условен. Одна из этих частиц — нейтрон — в свободном состоянии существует в среднем лишь около 15 мин, а затем самопроизвольно распадается на протон, электрон и нейтрино. Однако считать протон, электрон и нейтрино «настоящими» элементарными частицами, а нейтрон «ненастоящей» элементарной частицей нельзя, так как каждая из этих частиц при взаимодействии с другими частицами и атомными ядрами может превращаться в другие частицы.

Полное число параметров, определяющих свойства частиц, довольно велико. Важнейшими из них являются масса частицы, ее электрический заряд, спин и время жизни. Из всех названных характеристик специального пояснения требует лишь спин. Спином называется величина, дающая количественную характеристику вращательного движения частицы. Спин частицы (механический момент) у различных частиц может иметь различные значения, но все частицы одного типа имеют абсолютно одинаковые спины.

Любой из электронов обладает механическим моментом, равным $0{,}50272 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Эта величина в точности равна $\frac{1}{2}\hbar$ $\left(\hbar = \frac{h}{2\pi};\ h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж}\cdot\text{с} — \text{постоянная Планка}\right)$. Величина $\hbar$ принята за единицу спина.

После знакомства с основными характеристиками элементарных частиц можно рассмотреть таблицу элементарных частиц (с. 334), время жизни которых превышает 10^{-20} с. Частицы в ней расположены в порядке возрастания их масс. Частицы с массами, не превышающими 207 электронных масс (кроме одной из них), составляют группу легких частиц — лептонов, частицы с массами больше 207 электронных масс, но меньше массы протона входят в группу мезонов (средних частиц), протон и более тяжелые частицы составляют группу барионов. Особое место в таблице занимает фотон, не входящий ни в одну из названных групп.

Разделение элементарных частиц на группы определяется не только различием в массах, но и рядом других существенных свойств. Лептоны и барионы имеют спин, равный $\frac{1}{2}$, спины мезонов равны нулю, а фотон обладает спином, равным 1.

Особенно следует отметить существование четырех типов взаимодействия между элементарными частицами — гравитационного, электромагнитного, сильного и слабого. Наиболее хорошо изученными являются гравитационные силы, действующие между любыми частицами, и электромагнитные силы, действующие между заряженными частицами.

Примером сильного взаимодействия могут служить ядерные силы, связывающие в атомных ядрах протоны и нейтроны. Слабое взаимодействие обнаруживается в процессах, связанных с испусканием или поглощением нейтрино.

Античастицы. Английский физик Поль Дирак в 1928 г. создал теорию, из которой следовало, что в природе должна существовать частица с массой, равной массе электрона, но заряженная положительно. Такая частица — позитрон — была обнаружена экспериментально в 1932 г.

В 1933 г. Фредерик и Ирен Жолио-Кюри обнаружили, что гамма-квант с энергией, большей энергии покоя электрона и позитрона $E = 2mc^2 \approx 1{,}02$ МэВ, при прохождении вблизи атомного ядра может превратиться в пару электрон — позитрон. Электрон и позитрон, способные к совместному «рождению» в паре и к аннигиляции при встрече, назвали античастицами. Рождение электронно-позитронных пар и аннигиляция электронов и позитронов при встрече наглядно показывают, что две формы материи — вещество и поле — не являются резко разграниченными, возможны превращения материи из одной формы в другую.

После открытия первой античастицы — позитрона — естественно возник вопрос о существовании античастиц и у других частиц.

К настоящему времени установлено, что античастица имеется у каждой элементарной частицы. Масса любой античастицы в точности равна массе соответствующей частицы, а электрический заряд (для заряженных частиц) равен по абсолютному значению заряду частицы и противоположен ему по знаку. Частица и античастица у таких незаряженных частиц, как фотон и пи-нуль-мезон, по физическим свойствам совершенно неразличимы и поэтому считаются одной и той же частицей.

Кварки. Кроме частиц, представленных в таблице, открыто большое число частиц с очень малым временем жизни — около 10^{-22} с. Эти частицы названы *резонансами*. С открытием этих частиц неопределенность понятия «элементарная частица» стала особенно заметной.

В 1963 г. М. Гелл-Манном и Дж. Цвейгом была предложена гипотеза о существовании в природе нескольких частиц, названных *кварками*. Согласно этой гипотезе все мезоны, барионы и резонансы построены из кварков и антикварков, соединенных между собой в различных комбинациях. Каждый барион состоит из трех кварков, антибарион — из трех антикварков. Мезоны состоят из пар кварков с антикварками.

Волновые свойства частиц. Изучение свойств света показало, что он обладает сложной природой, сочетающей в себе волновые и корпускулярные свойства.

Полная энергия фотона (кванта света) может быть выражена через постоянную Планка h ($h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с) и частоту электромагнитных колебаний ν:

$$E = h\nu.$$

С другой стороны, по закону взаимосвязи массы и энергии

полная энергия фотона может быть выражена через его массу m и скорость света c:

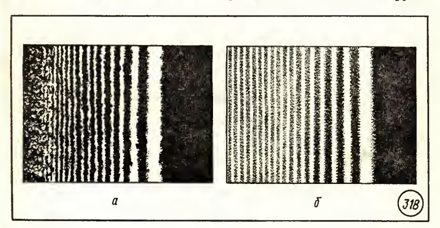
$$E=mc^2.$$

Из этих двух соотношений получаем, что $\nu=\frac{mc^2}{h}$, а $\lambda=\frac{c}{\nu}=\frac{h}{mc}$, т. е. длина световой волны λ равна постоянной Планка h, деленной на импульс фотона mc.

Французский физик Луи де Бройль в **1924** г. высказал предположение, что одновременное сочетание волновых и корпускулярных свойств присуще не только свету, но и вообще любому материальному объекту. Длина волны любого тела массой m, движущегося со скоростью v, определяется соотношением, аналогичным полученному для фотонов света:

$$\lambda=\frac{h}{mv}.$$

Для тел значительной массы длина волны получается настолько малой, что никакого способа обнаружения его волновых свойств современная физика предложить не может. Элементарные частицы и даже атомы при небольших скоростях движения проявляют свои волновые свойства вполне определенно. На рисунке 318, *а* представлена фотография, полученная при пропускании пучка электронов у края экрана. Светлые полосы отмечают места попадания электронов на фотопластинку. Полученная картина есть результат дифракции электронов у края экрана. Длина волны, определенная по наблюдаемой дифракционной картине, в точности совпадает со значением, рассчитанным по соотношению де Бройля. Для сравнения на рисунке 318, *б* показана картина, наблюдаемая при прохождении пучка света у края экрана. Таким образом, обычное разделение материи на две формы — поле и вещество — оказывается довольно условным. Частицы вещества обнаруживают признаки непрерывного волнового процесса, и, наоборот, электромагнитные волны обнаружи-



318

Формулы

Фотон

$$E=h\nu,\ m=\frac{E}{c^2}=\frac{h\nu}{c^2},\qquad p=mc=\frac{h\nu}{c}.$$

Фотоэлектрический эффект

$$E_k=h\nu-A,\qquad h\nu_{\min}=A,\qquad \nu_{\min}=\frac{A}{h}.$$

Постулат Бора и правило квантования

$$h\nu=E_m-E_n,\qquad m\upsilon r=n\frac{h}{2\pi}.$$

Энергия связи атомного ядра

$$\Delta E_{\text{св}}=\Delta mc^2,\qquad \Delta m=Zm_p+Nm_n-m_{\text{я}}.$$

Закон радиоактивного распада

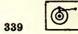
$$N=N_0\cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

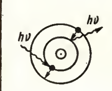
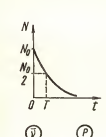
Бета-распад нейтрона

$$n\rightarrow p+e^-+\nu^-.$$

Реакция термоядерного синтеза

$${}^3_1\mathrm{H}+{}^2_1\mathrm{H}\rightarrow {}^4_2\mathrm{He}+{}^1_0n.$$



	Обозначения
	m — масса c — скорость света в вакууме E — энергия фотона h — постоянная Планка ν — частота A — работа выхода электрона E_k — максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов
	ν_{min} — частота красной границы фотоэффекта
	$\Delta E_{св}$ — энергия связи атомного ядра Z — число протонов в ядре N — число нейтронов в ядре m_p — масса покоя свободного протона m_n — масса покоя свободного нейтрона $m_я$ — масса покоя атомного ядра
	N — число нераспавшихся радиоактивных ядер в момент времени t N_0 — число нераспавшихся радиоактивных ядер в момент времени $t=0$ T — период полураспада
	n — нейтрон p — протон e — электрон $\tilde{\nu}$ — антинейтрино

вают свойства потока частиц-фотонов.

Гипотеза де Бройля и атом Бора. Гипотеза о волновой природе электрона позволила дать принципиально новое объяснение стационарным состояниям в атомах. Для того чтобы понять это объяснение, выполним сначала расчет длины дебройлевской волны электрона, движущегося по первой разрешенной круговой орбите в атоме водорода. Подставив в уравнение де Бройля выражение для скорости электрона на первой круговой орбите, найденное из правила квантования Бора

$$mvr = n\frac{h}{2\pi},$$

получим

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{2\pi r_1 mh}{mh} = 2\pi r_1.$$

Это значит, что в атоме водорода, находящемся в первом стационарном состоянии, длина дебройлевской волны электрона в точности равна длине его круговой орбиты! Для любой другой орбиты с порядковым номером n получаем

$$n\lambda = 2\pi r_n.$$

Этот результат позволяет выразить постулат Бора о стационарных состояниях в такой форме: стационарным состояниям атома соответствуют такие орбиты электронов, на которых укладывается целое число длин волн де Бройля.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

171. Определите красную границу фотоэффекта для металла с работой выхода 2 эВ.

$A = 2$ эВ $= 2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж $= 3{,}2 \cdot 10^{-19}$ Дж
$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

λ_{max} — ?

Решение

Из уравнения Эйнштейна (82.4) для фотоэффекта при условии $E_k = 0$ имеем

$$h\nu_{min} = A.$$

Частота ν света связана с его скоростью c и длиной волны λ выражением

$$\nu = \frac{c}{\lambda}.$$

Из этих двух формул получаем

$$\frac{hc}{\lambda_{max}} = A, \qquad \lambda_{max} = \frac{hc}{A};$$

$$\lambda_{max} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}}{3{,}2 \cdot 10^{-19}} \text{ м} = 6{,}2 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

172. Найдите максимальную скорость электронов, освобождаемых при фотоэффекте светом с длиной волны $4 \cdot 10^{-7}$ м с поверхности материала с работой выхода 1,9 эВ.

Решение

$\lambda = 4 \cdot 10^{-7}$ м
$A = 1{,}9$ эВ $=$
$= 3{,}04 \cdot 10^{-19}$ Дж

v_{max} — ?

Для решения задачи воспользуемся уравнением Эйнштейна для фотоэффекта (82.4), подставив в него выражение $E_k = \frac{mv^2_{max}}{2}$ для максимальной кинетической энергии электронов:

$$h\nu = A + \frac{mv^2_{max}}{2}, \qquad \nu = \frac{c}{\lambda}, \qquad \frac{mv^2_{max}}{2} = \frac{hc}{\lambda} - A;$$

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2\frac{hc}{\lambda} - 2A}{m}};$$

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2\frac{6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^{-7}} - 2 \cdot 3{,}04 \cdot 10^{-19}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}}} \text{ м/с} \approx 6{,}5 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

173. Определите работу выхода электрона с поверхности фотокатода и красную границу фотоэффекта, если при облучении фотоэлемента светом с частотой $1{,}6 \cdot 10^{15}$ Гц фототок прекращается при запирающем напряжении 4,1 В.

Решение

$U_3 = 4{,}1$ В
$\nu = 1{,}6 \cdot 10^{15}$ Гц

A — ? $\quad \nu_{min}$ — ?

Используем условие запирания фототока:

$$eU_3 = \frac{mv^2_{max}}{2}.$$

С учетом этого условия уравнение Эйнштейна для фотоэффекта будет иметь вид

$$h\nu = A + eU_3, \qquad A = h\nu - eU_3.$$

Определим красную границу фотоэффекта:

$$h\nu_{min} = A, \qquad \nu_{min} = \frac{A}{h};$$

$$A = 6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{15} \text{ Дж} - 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 4{,}1 \text{ Дж} \approx 10{,}56 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} - 6{,}56 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

$$\nu_{min} = \frac{4 \cdot 10^{-19}}{6{,}6 \cdot 10^{-34}} \text{ Гц} = 6 \cdot 10^{15} \text{ Гц}.$$

342

174. При бомбардировке электронами атомы ртути переходят в возбужденное состояние, если энергия электронов равна 4,9 эВ или превышает это значение. Рассчитайте длину волны света, испускаемого атомом ртути при переходе из первого возбужденного состояния в нормальное.

Решение

$E=4{,}9$ эВ $=$
$=4{,}9\cdot 1{,}6\cdot 10^{-19}$ Дж $=$
$=7{,}84\cdot 10^{-19}$ Дж
$h=6{,}6\cdot 10^{-34}$ Дж$\cdot$с

ν — ?

Используем связь между энергией фотона и частотой: $E=h\nu$, отсюда $\nu=\frac{E}{h}$;

$$\lambda=\frac{c}{\nu}=\frac{ch}{E};$$

$$\lambda=\frac{3\cdot 10^{8}\cdot 6{,}6\cdot 10^{-34}}{7{,}84\cdot 10^{-19}}\text{ м}\approx 2{,}5\cdot 10^{-7}\text{ м}.$$

175. Вычислите энергию связи ядра атома дейтерия.

Решение

$m_p=1{,}00728$ а.е.м.
$m_n=1{,}00866$ а.е.м.
$M_{^2_1\text{H}}=2{,}01410$ а.е.м.
$m_e=0{,}00055$ а.е.м.

ΔE — ?

Энергия связи ядра равна

$$\Delta E=\Delta mc^2,$$

где Δm — разность суммы масс свободных частиц, входящих в состав ядра, и массы ядра; c — скорость света в вакууме. Для нахождения разности масс отыскиваем в справочнике по физике[1] сведения о массах протона m_p, нейтрона m_n и электрона m_e и атома дейтерия $M_{^2_1\text{H}}$. Для нахождения массы ядра дейтерия $m_я$ необходимо вычесть из массы атома дейтерия массу электрона, находящегося на его оболочке:

$$\Delta m=m_p+m_n-m_я=m_p+m_n-(M_{^2_1\text{H}}-m_e);$$

$$\Delta m=1{,}00728\text{ а.е.м.}+1{,}00866\text{ а.е.м}-2{,}01410\text{ а.е.м.}+0{,}00055\text{ а.е.м.}=$$
$$=0{,}00239\text{ а.е.м.}$$

Но 1 а.е.м. $=1{,}66\cdot 10^{-27}$ кг, поэтому

$$\Delta m=0{,}00239\cdot 1{,}66\cdot 10^{-27}\text{ кг}=3{,}967\cdot 10^{-30}\text{ кг, а}$$
$$\Delta E=3{,}967\cdot 10^{-36}\cdot 9\cdot 10^{16}\text{ Дж}=3{,}57\cdot 10^{-13}\text{ Дж, или}$$

$$\Delta E=\frac{3{,}57\cdot 10^{-13}\text{ Дж}}{1{,}6\cdot 10^{-19}\ \frac{\text{Дж}}{\text{эВ}}}=2{,}23\cdot 10^{6}\text{ эВ}=2{,}23\text{ МэВ}.$$

---

[1] См., например: Енохович А. С. Справочник по физике и технике.— М.: Просвещение, 1983.



176. **Вычислите энергетический выход ядерной реакции**

$$^{6}_{3}Li + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + ^{4}_{2}He.$$

Решение

Для вычисления энергетического выхода ядерной реакции необходимо найти разность масс частиц, вступающих в реакцию, и частиц — продуктов реакции. В реакции участвуют атомные ядра, но в справочных таблицах обычно даются сведения лишь о массах атомов. Можно найти массу каждого атомного ядра вычитанием массы электронов оболочки из массы атома. Можно поступить иначе. Если в уравнении ядерной реакции слева и справа пользоваться только массами атомов (т. е. массой атома водорода, а не массой протона слева, и массой атома гелия, а не массой альфа-частицы справа), то из-за одинаковости числа электронов в атомах, вступающих в реакцию, и в продуктах реакции их вычитание осуществляется автоматически при нахождении разности масс. Таким образом, для решения задачи можно воспользоваться сведениями из справочника о массах атомов:

$M_{^{6}_{3}Li} = 6{,}01512$ а.е.м.

$M_{^{1}_{1}H} = 1{,}00782$ а.е.м.

$M_{^{3}_{2}He} = 3{,}01605$ а.е.м

$M_{^{4}_{2}He} = 4{,}00260$ а.е.м.

ΔE — ?

$$\Delta E = \Delta mc^2,$$

$$\Delta m = M_{^{6}_{3}Li} + M_{^{1}_{1}H} - M_{^{3}_{2}He} - M_{^{4}_{2}He};$$

$$\Delta m = 6{,}01512 \text{ а.е.м.} + 1{,}00782 \text{ а.е.м.} - 3{,}01605 \text{ а.е.м} - 4{,}00260 \text{ а.е.м.} = 0{,}00429 \text{ а.е.м.}$$

Вычислим энергетический выход при изменении массы на 1 а.е.м.:

$$\Delta E = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \approx 1{,}49 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} \approx 931 \text{ МэВ}.$$

Выход ядерной реакции равен

$$\Delta E = 0{,}00429 \text{ а.е.м.} \cdot 931 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} = 4{,}0 \text{ МэВ}.$$

177. При осуществлении термоядерной реакции синтеза ядра гелия из ядер изотопов водорода — дейтерия и трития — по схеме

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$$

освобождается энергия 17,6 МэВ. Какая энергия освободится при синтезе 1 г гелия? Сколько каменного угля потребовалось бы сжечь для получения такой же энергии?



$m_1 = 1$ г $= 10^{-3}$ кг
$M = 4 \cdot 10^{-3}$ кг·моль$^{-1}$
$\Delta E = 17{,}6$ МэВ $= 2{,}8 \times 10^{12}$ Дж
$q = 2{,}7 \cdot 10^7$ Дж·кг$^{-1}$

E — ? m_2 — ?

Решение

Для нахождения энергии, выделяющейся при синтезе 1 г гелия, нужно умножить выход ядерной реакции ΔE на число осуществленных реакций, равное числу атомов гелия N в 1 г: $E = \Delta E N$.

Число атомов гелия N равно

$$N = \frac{mN_A}{M}; \qquad N = \frac{10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{23}}{4 \cdot 10^{-3}} = 1{,}5 \cdot 10^{23}.$$

Поэтому для энергии E получим

$$E = 2{,}8 \cdot 10^{-12} \cdot 1{,}5 \cdot 10^{23} \text{ Дж} = 4{,}2 \cdot 10^{11} \text{ Дж}.$$

Из условия $Q = E$ следует $\quad Q = qm_2, \qquad m_2 = \frac{Q}{q} = \frac{E}{q}.$

Отсюда масса каменного угля, при сжигании которого освобождается столько же энергии, сколько и при синтезе 1 г гелия, равна

$$m_2 = \frac{4{,}2 \cdot 10^{11} \text{ Дж}}{2{,}7 \cdot 10^7 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}} = 1{,}56 \cdot 10^4 \text{ кг}.$$

178. Определите второй продукт ядерной реакции

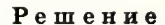
$${}^{6}_{3}\text{Li} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{4}_{2}\text{He} + X.$$

Решение

Для определения второго продукта ядерной реакции необходимо использовать тот факт, что при осуществлении ядерных реакций число барионов остается неизменным. Отсюда следует, что сумма протонов в частицах, вступающих в реакцию, должна быть равна сумме протонов в частицах — продуктах реакции, а общее число нуклонов в левой части уравнения равно общему числу нуклонов в правой его части. Число протонов в частицах, вступивших в данную ядерную реакцию, равно 3. В ядре гелия ${}^{4}_{2}$He только два протона, следовательно, во втором продукте ядерной реакции содержится один протон. Таким образом, второй продукт ядерной реакции является одним из изотопов водорода. Найдем массовое число этого изотопа. Общее число нуклонов в ядрах, представленных в левой части уравнения, равно 7. В ядре гелия ${}^{4}_{2}$He четыре нуклона, следовательно, на долю второго продукта ядерной реакции приходится три нуклона. Таким образом, второй продукт ядерной реакции является изотопом водорода — тритием ${}^{3}_{1}$H.

179. Определите, какая частица участвует в осуществлении ядерной реакции

$${}^{14}_{7}\text{N} + X \rightarrow {}^{17}_{8}\text{O} + {}^{1}_{1}\text{H}.$$



Решение

Воспользовавшись свойством сохранения числа протонов и общего числа нуклонов при осуществлении ядерных реакций, можно определить, что неизвестная частица X содержит два протона и состоит из четырех нуклонов. Следовательно, это ядро атома гелия ^4_2He (альфа-частица).

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

180. Определите красную границу фотоэффекта для металла с работой выхода 2,5 эВ.

181. Красная граница фотоэффекта для металла равна $4{,}5 \cdot 10^{-7}$ м. Определите работу выхода.

182. Найдите максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, освобождаемых с поверхности тела, из материала с работой выхода 2 эВ при освещении светом длиной волны $3{,}5 \cdot 10^{-7}$ м.

183. Найдите максимальную скорость фотоэлектронов при освещении поверхности тела из материала с работой выхода 1,9 эВ светом длиной волны $4 \cdot 10^{-7}$ м.

184. При какой частоте света, падающего на поверхность тела из металла с работой выхода 2,2 эВ, максимальная скорость фотоэлектронов равна 1000 км/с?

185. При какой частоте фотона масса фотоэлектрона может стать равной массе покоя протона?

186. На рисунке 319 представлена энергетическая диаграмма состояний атома. Стрелками на диаграмме указаны переходы с излучением или поглощением фотонов. При каком из обозначенных на рисунке переходов происходит поглощение фотона с максимальной энергией? Какой из переходов сопровождается излучением фотона с минимальной частотой?

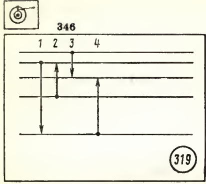
187. По рисунку 319 определите переход с излучением фотона с максимальной энергией и переход с поглощением света с максимальной длиной волны.

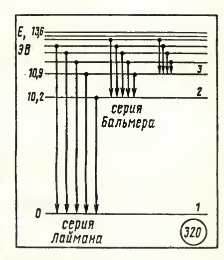
188. На рисунке 320 представлена энергетическая диаграмма состояний атома водорода. Определите длину волны излучения, испускаемого при переходе атома с энергетического уровня *3* на уровень *2*.

189. По диаграмме на рисунке 320 определите частоту света, поглощаемого при переходе с уровня *1* на уровень *3*.

190. При каком минимальном значении энергии электронов могут происходить неупругие столкновения электронов с атомами водорода?

191. При каком минимальном значении энергии электронов, сталкивающихся с атомами водорода, может наблюдаться возникновение всех возможных линий в спектре водорода?





192. Однозарядные ионы изотопа цезия массой 133 а.е.м. разгоняются в электрическом поле напряжением 2000 В и движутся в однородном магнитном поле масс-спектрографа. Определите радиус окружности, по которой движутся ионы, если индукция магнитного поля 0,25 Тл.

193. Вычислите энергию связи ядра атома трития ^3_1H.

194. Вычислите удельную энергию связи нуклонов в ядре атома гелия ^4_2He.

195. Какое ядро образуется в результате альфа-распада ядра изотопа урана $^{234}_{92}U$?

196. Какое ядро образуется в результате электронного бета-распада изотопа водорода ^3_1H?

197. Какое ядро образуется в результате позитронного бета-распада ядра изотопа меди $^{64}_{29}Cu$?

198. Период полураспада изотопа радия $^{226}_{88}Ra$ 1600 лет. Сколько ядер изотопа испытает распад за 3200 лет, если начальное число радиоактивных ядер 10^9?

199. Период полураспада ядер изотопа иода $^{131}_{53}I$ — 8 суток. Сколько радиоактивных ядер этого изотопа останется в образце через 80 суток, если начальное количество радиоактивных ядер равно 10^9?

200. Допустимая доза общего облучения человека гамма-излучением или бета-частицами 5 рад за год. Какова допустимая мощность дозы общего облучения человека при условии непрерывного действия излучения на человека круглосуточно в течение всего года? Мощность дозы выразите в мрад/ч.

201. Мощность дозы гамма-излучения радиоактивных изотопов в зоне заражения 20 рад/ч. Сколько часов может работать в этой зоне человек, если допустимой безопасной дозой в аварийной обстановке принята доза 25 рад?

202. Вычислите энергетический выход реакции

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H.$$

Масса атома азота 14,003074 а.е.м., атома кислорода 16,999133 а.е.м.

ПРИЛОЖЕНИЯ



Ответы к задачам для самостоятельного решения . . . 348
Физические постоянные . . 350
Физические величины и их единицы в СИ 351
Приставки СИ для образования десятичных кратных и дольных единиц 358
Предметный указатель . . . 359
Именной указатель 366
Литература 367



ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

14. 580 м
15. 0,75 м/с^2
16. 3 м/с; 21 м
17. 20 м/с
18. 100 м
19. $\sim$2170 м
20. 70 см
21. 4 м/с^2
22. 10^6 м/с^2
23. 4 м/с^2
24. $\sim$24,5 м/с
25. $\sim$3,6 м/с
26. $\sim$167 м
27. 5 Н
28. 0,5 м/с^2
29. $\sim$2650 км
30. $\sim 1{,}3\cdot10^{-8}$ Н; $\sim 124\cdot10^3$ с $\approx 34{,}5$ ч
31. $\sim$7,33 км/с
32. $\sim 6{,}5\cdot10^{23}$ кг
33. $\sim$42 000 км
34. $\sim$8000 Н
35. $\sim 1{,}5\cdot10^3$
36. $\sim$1 ч 23 мин $\approx 5\cdot10^3$ с
37. 37,5 м; 50 м
38. $\sim$9,1 м
39. $\sim$14,1 м/с
40. 4000 Н
41. 4 раза
42. $\sim$1,57 м/с
43. $\sim$105 м/с
44. $7\cdot10^6$ Н
45. $2{,}5\cdot10^5$ Дж
46. $\sim 4{,}33\cdot10^3$ Дж
47. $-7\cdot10^3$ Дж
48. $\sim 6\cdot10^3$ Дж
49. 1 Дж
50. $\sim$19,5 м/с
51. $\sim 5{,}6\cdot10^3$ м^3
52. $1{,}4\cdot10^6$ Дж
53. $mg\cdot(3-2\cos\alpha)\approx mg\cdot 1{,}0076 \approx 9{,}88$ Н
54. 5 раз
55. $V=\dfrac{m+M}{m}\sqrt{2gl\,(1-\cos\alpha)}$
71. $1{,}2\cdot10^{-19}$ Дж
72. $5{,}4\cdot10^3$ Па
73. $1{,}7\cdot10^{-15}$ Па
74. $4{,}8\cdot10^{20}$ К
75. $2{,}4\cdot10^{25}$ м$^{-3}$
76. $4{,}1\cdot10^7$ Па
77. 241 К
78. $\sim$ 3,4 м^3
79. $\sim$ 2600 К
80. $\sim 1{,}7\cdot10^{-2}$ кг $=$ 17 г
81. $\sim 1{,}8\cdot10^{-2}$ кг
82. 50 мН/м
83. $5\cdot10^{-2}$ м
84. 140 Н
85. 140 м
86. Увеличилась на 600 Дж
87. 300 Дж
88. 385 м/с
89. 0 °С
90. 0 °С
91. 33%
92. 200 Дж
93. 25%
94. 57%
95. 1500 К
111. $\sim 10{,}3\cdot10^{-4}$ Н
112. $\sim 5{,}8\cdot10^{11}$ В/м
113. 200 В/м
114. 81 В/см
115. $5\cdot10^3$ В/м

116. 50 Дж
117. $2,4 \cdot 10^{-16}$ Дж
118. $\sim 1,87 \cdot 10^7$ м/с
119. $\sim 1,6$ м^2
120. 0,5 мкФ
121. $1,25 \cdot 10^4$ В
122. 2 В; 4 В
123. $5 \cdot 10^{-4}$ Дж
124. 16 В
125. 1,5 В; 1 Ом
126. $2,7 \cdot 10^2$ ч
127. 0,31 Н
128. 6 А
129. 10^{-2} Тл
130. $5 \cdot 10^{-3}$ Вб
131. $5,7 \cdot 10^{-2}$ м
132. $6,55 \cdot 10^{-8}$ с
133. $1,6 \cdot 10^{-4}$ Кл
134. 0,45 Гн
135. $8,1 \cdot 10^{-3}$ Дж
148. 9 раз
149. $\sim 4,93$ с
150. $\sim 0,17$ м
151. ~ 2 км
152. Увеличится в $\sqrt{2}$ раз
153. Увеличится в 2 раза
154. $\sim 7,1 \cdot 10^{-2}$ В
155. $\sim 0,53$ с$^{-1}$
156. 310 Дж
157. 484 Ом
158. $\sim 0,8$ Гн
159. 318 Ом
160. ~ 800 Гц
161. $\sim 1,6$ мкФ
162. ~ 500 Гц
163. $5,5 \cdot 10^3$ В
164. 0,33 м
165. $-0,2$ м
166. 0,276 м
167. ~ 13 см
168. $\approx 260\,000$ км/с
169. $\sim 3,3$ т
170. $\sim 4,2 \cdot 10^6$ т
180. $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ м
181. $4,4 \cdot 10^{-19}$ Дж
182. $2,46 \cdot 10^{-19}$ Дж
183. $1,05 \cdot 10^6$ м/с
184. $\sim 1,22 \cdot 10^{15}$ Гц
185. $\sim 2,3 \cdot 10^{23}$ Гц
186. 4; 3
187. 1; 2
188. $6,56 \cdot 10^{-7}$ м
189. $1,03 \cdot 10^{-7}$ м
190. 10,2 эВ
191. 13,6 эВ
192. 0,15 м
193. 8,4819 МэВ
194. 7,074 МэВ
195. $^{230}_{90}Th$
196. $^{3}_{2}He$
197. $^{64}_{28}Ni$
198. $7,5 \cdot 10^8$
199. $9,76 \cdot 10^5$
200. 0,57 мрад/ч
201. 1250 ч
202. 1,2 МэВ



Физические постоянные

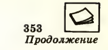
Постоянная	Обозначение	Значение
Гравитационная постоянная	G	$6{,}6720 \cdot 10^{-11}$ Н·м^2·кг$^{-2}$
Скорость света в вакууме	c	$2{,}99792458 \cdot 10^8$ м·с$^{-1}$
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн·м$^{-1}$ = $= 1{,}25663706144 \cdot 10^{-6}$ Гн·м$^{-1}$
Электрическая постоянная	ε_0	$8{,}85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф·м$^{-1}$
Постоянная Планка	h	$6{,}626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
	$\hbar = h/2\pi$	$1{,}0545887 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Масса покоя электрона	m_e	$9{,}109534 \cdot 10^{-31}$ кг $5{,}4858026 \cdot 10^{-4}$ а. е. м.
Масса покоя протона	m_p	$1{,}6726485 \cdot 10^{-27}$ кг 1,007276470 а. е. м.
Масса покоя нейтрона	m_n	$1{,}6749543 \cdot 10^{-27}$ кг 1,008665012 а. е. м.
Заряд электрона (абс. значение)	e	$1{,}6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
Атомная единица массы		$1{,}6605655(86) \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Авогадро	N_A	$6{,}022045 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
Постоянная Фарадея	F	96484,56 Кл·моль$^{-1}$
Молярная газовая постоянная	R	8,31441 Дж·моль$^{-1}$·К$^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1{,}380662 \cdot 10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$
Нормальный (молярный) объем идеального газа при нормальных условиях ($t = 0$ °C, $p = 101{,}325$ кПа)	V_0	$2{,}241 \cdot 10^{-2}$ м^3/моль
Нормальное атмосферное давление	$p_{\text{атм. н}}$	101 325 Па
Ускорение свободного падения (нормальное)	g_n	9,80665 м/с^2
Энергия покоя электрона	$m_e c^2$	0,5110034 МэВ
Энергия покоя протона	$m_p c^2$	938,2796 МэВ
Энергия покоя нейрона	$m_n c^2$	939,5731 МэВ
Масса атома водорода ^{1}H		1,07825036 а. е. м.
Масса атома дейтерия ^{2}H		2,014101795 а. е. м.
Масса атома гелия-4 ^{4}He		4,002603267 а. е. м.
Радиус первой боровской орбиты	a_0	$5{,}2917706 \cdot 10^{-11}$ м

Физические величины и их единицы в СИ

Наименование величины	Единица			
	Наименование	Обозначение		Определение
		международное	русское	
		Основные единицы		
Длина	Метр	m	м	Метр равен расстоянию, проходимому в вакууме плоской электромагнитной волной за 1/299 792 458 долей секунды
Масса	Килограмм	kg	кг	Килограмм равен массе международного прототипа килограмма
Время	**Секунда**	s	с	Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133
Сила электрического тока	Ампер	A	А	Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н
Термодинамическая температура	Кельвин	K	К	Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды
Количество вещества	Моль	mol	моль	Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля струк-

Продолжение

Наименование величины	Единица: Наименование	Обозначение: международное	Обозначение: русское	Определение
				турные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц
Сила света	Кандела	cd	кд	Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср
	Дополнительные единицы			
Плоский угол	Радиан	rad	рад	Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу
Телесный угол	Стерадиан	sr	ср	Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы
	Производные единицы пространства и времени			
Площадь	Квадратный метр	m^2	$м^2$	Квадратный метр равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны 1 м
Объем, вместимость	Кубический метр	m^3	$м^3$	Кубический метр равен объему куба с ребрами, длины которых равны 1 м
Скорость	Метр в секунду	m/s	м/с	Метр в секунду равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой



Продолжение

Наименование величины	Единица			
	Наименование	Обозначение		Определение
		международное	русское	
				точка за время 1 с перемещается на расстояние 1 м
Ускорение	Метр на секунду в квадрате	m/s^2	$м/с^2$	Метр на секунду в квадрате равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки возрастает на 1 м/с
Угловая скорость	Радиан в секунду	rad/s	рад/с	Радиан в секунду равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, при которой за время 1 с совершается поворот тела относительно оси вращения на угол 1 рад
Период	Секунда	s	с	
Частота периодического процесса	Герц	Hz	Гц	Герц равен частоте периодического процесса, при которой за время 1 с происходит один цикл периодического процесса
Производные единицы механических величин				
Плотность	Килограмм на кубический метр	kg/m^3	$кг/м^3$	Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1 $м^3$ равна 1 кг
Импульс (количество движения)	Килограмм-метр в секунду	kg·m/s	кг·м/с	Килограмм-метр в секунду равен импульсу (количеству движения) тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с
Сила	Ньютон	N	Н	Ньютон равен силе, сообщающей телу массой 1 кг ускорение 1 $м/с^2$ в направлении действия силы
Момент силы, момент пары сил	Ньютон-метр	N·m	Н·м	Ньютон-метр равен моменту силы, создаваемому силой 1 Н относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы



Продолжение

Наимеиование величины	Единица			
	Наименование	Обозначение		Определение
		международное	русское	
Импульс силы	Ньютон-секунда	N·s	Н·с	Ньютои-секунда равиа импульсу силы, создаваемому силой 1 Н, действующей в течение времени 1 с
Давление, напряжение (механическое)	Паскаль	Pa	Па	Паскаль равен давлеиию (механическому напряжению), вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальиой к ней поверхности площадью 1 $м^2$
Работа, энергия	Джоуль	J	Дж	Джоуль равен работе, совершаемой при перемещении точки приложения силы 1 Н на расстояние 1 м в направлении действия силы
Мощиость	Ватт	W	Вт	Ватт равен мощности, прн которой совершается работа 1 Дж за время 1 с
Поверхиостное натяжение	Ньютои иа метр	N/m	Н/м	Ньютон на метр равеи поверхиостиому натяжению, создаваемому силой 1 Н, приложенной к участку контура свободиой поверхиости длииой 1 м н действующей нормально к контуру н по касательиой к поверхности
Производиые единнцы тепловых величин				
Температура Цельсия	Градус Цельсия	°C	°C	По размеру градус Цельсия равен кельвииу
Количество теплоты	Джоуль	J	Дж	Джоуль равен количеству теплоты, эквивалеитиому работе 1 Дж
Теплоемкость	Джоуль на кельвин	J/K	Дж/К	Джоуль иа кельвии равен теплоемкости снстемы, температу-

Продолжение

Наименование величины	Единица			
	Наименование	Обозначение		Определение
		международное	русское	
				ра которой повышается на 1 К при подведении к системе количества теплоты 1 Дж
Удельная теплоемкость	Джоуль на килограмм-кельвин	J/(kg·K)	Дж/(кг·К)	Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость 1 Дж/К
Производные единицы величин молекулярной физики				
Молярная масса	Килограмм на моль	kg/mol	кг/моль	Килограмм на моль равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль массу 1 кг
Производные единицы электрических и магнитных величин				
Количество электричества, электрический заряд	Кулон	C	Кл	Кулон равен количеству электричества, проходящего через поперечное сечение при токе силой 1 А за время 1 с
Напряженность электрического поля	Вольт на метр	V/m	В/м	Вольт на метр равен напряженности однородного электрического поля, при которой между двумя точками, находящимися на линии напряженности поля на расстоянии 1 м, создается разность потенциалов 1 В
Электрическое напряжение, электрический потенциал; разность электрических	Вольт	V	В	Вольт равен электрическому напряжению на участке электрической цепи, при котором в участке проходит постоянный ток силой 1 А и затрачивается мощность 1 Вт



Продолжение

Наименование величины	Единица			
	Наименование	Обозначение		Определение
		международное	русское	
потенциалов; электродвижущая сила				
Электрическая емкость	Фарад	F	Ф	Фарад равен электрической емкости конденсатора, при которой заряд 1 Кл создает на конденсаторе напряжение 1 В
Магнитная индукция	Тесла	T	Тл	Тесла равен магнитной индукции, при которой магнитный поток сквозь поперечное сечение площадью 1 м^2 равен 1 Вб
Магнитный поток	Вебер	Wb	Вб	Вебер равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением 1 Ом через поперечное сечение проводника проходит количество электричества 1 Кл
Индуктивность	Генри	H	Гн	Генри равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб
Электрическое сопротивление	Ом	Ω	Ом	Ом равен электрическому сопротивлению участка электрической цепи, при котором постоянный ток силой 1 А вызывает падение напряжения 1 В
Удельное электрическое сопротивление	Ом-метр	Ω·m	Ом·м	Ом-метр равен удельному электрическому сопротивлению вещества, при котором участок выполненной из этого вещества электрической цепи длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м^2 имеет сопротивление 1 Ом

Продолжение

Наименование величины	Единица			
	Наименование	Обозначение		Определение
		международное	русское	
Производные единицы световых величин				
Энергия излучения	Джоуль	J	Дж	Джоуль равен энергии излучения, эквивалентной работе 1 Дж
Поток излучения, мощность излучения	Ватт	W	Вт	Ватт равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности 1 Вт
Световой поток	Люмен	lm	лм	Люмен равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд
Световая энергия	Люмен-секунда	lm·s	лм·с	Люмен-секунда равна световой энергии, соответствующей световому потоку 1лм, излучаемому или воспринимаемому в течение 1 с
Яркость	Кандела на квадратный метр	cd/m^2	кд/м^2	Кандела на квадратный метр равна яркости светящейся поверхности площадью 1 м^2 при силе света 1 кд
Светимость	Люмен на квадратный метр	lm/m^2	лм/м^2	Люмен на квадратный метр равен светимости поверхности площадью 1 м^2, испускающей световой поток 1 лм
Освещенность	Люкс	lx	лк	Люкс равен освещенности поверхности площадью 1 м^2 при световом потоке падающего на нее излучения, равном 1 лм
Производные единицы величин ионизирующих излучений				
Поглощенная доза излучения	Грэй	Gy	Гр	Грэй равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия любого ионизирующего излучения 1 Дж



Продолжение

Наименование величины	Единица			
	Наименование	Обозначение		Определение
		международное	русское	
Мощность поглощенной дозы излучения (мощность дозы излучения)	Грэй в секунду	Gy/s	Гр/с	Грэй в секунду равен мощности поглощенной дозы излучения, при которой за время 1 с облученным веществом поглощается доза излучения 1 Дж/кг
Активность нуклида в радиоактивном источнике	Беккерель	Bq	Бк	Беккерель равен активности нуклида, при которой за время 1 с происходит один акт распада

Приставки СИ для образования десятичных и дольных единиц

Наименование	Обозначение приставки		Множитель
	русское	международное	
экса	Э	E	10^{18}
пета	П	P	10^{15}
тера	Т	T	10^{12}
гига	Г	G	10^{9}
мега	М	M	10^{6}
кило	к	k	10^{3}
гекто	г	h	10^{2}
дека	да	da	10^{1}
деци	д	d	10^{-1}
санти	с	c	10^{-2}
милли	м	m	10^{-3}
микро	мк	μ	10^{-6}
нано	н	n	10^{-9}
пико	п	p	10^{-12}
фемто	ф	f	10^{-15}
атто	а	a	10^{-18}



ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абсолютный нуль температуры 78
Абсолютная температурная шкала 78
Автоколебания 220
Автоколебательная система 220
Адиабата 100
Адиабатный процесс 39
Активное сопротивление 241
Акустика 223
Акустический резонанс 224
Акцепторные примеси 155
Альфа-частицы 321
Альфа-распад 321
Аморфное тело 88
Ампер 177
Амплитуда 216
Анизатропия 88
Антенна 254
Античастицы 336
Атомное ядро 317

Б

Бета-частицы 332
Бета-распад 332
Биологическое действие ионизирующих излучений 325
Броуновское движение 72

В

Ватт 44
Вебер 188
Вес тела 24
Вечный двигатель 96, 105
Взаимодействие атомов и молекул 71
Взаимодействие тел 15
Взаимодействие ядерных излучений с веществом 324
Видеозапись 194
Виды равновесия 33
Влажность 87
Внутреннее сопротивление источника тока 150
Внутренняя энергия 94
Возбужденные состояния атомов 311
— — атомных ядер 321
Воздухоплавание 39
Волновая поверхность 224
Волновой фронт 224
Волновые свойства частиц 336
Волны 221
— звуковые 223
— механические 221
— поперечные 221
— продольные 221
— электромагнитные 247
Вольт 140
Вращательное движение 4
Вынужденные механические колебания 214
— электрические колебания 237
Высота звука 224

Г

Газ идеальный 74
Гальванопластика 164
Гальваностегия 164
Гамма-лучи 280, 321
Гармонические колебания 216
Генератор переменного тока машинный 237
— транзисторный 235
Генри 190
Гидравлическая машина 36
Главная оптическая ось 296



Главный фокус 270
Глаз 273
— блнзорукнй 274
— дальнозоркий 274
Гравнтационная постоянная 23
График скоростн при равномерном двнженнн 11
— — прн равноускоренном движении 10
Громкоговорнтель 192
Громкость 223
Грэй 325

Д

Давление 35
— атмосферное 39
— идеального газа 74
— света 303
Двигатель внутреннего сгорания 109
— реактивный 41
Двнжение заряженных частнц в магнитном поле 181
— механическое 4
— равномерное прямолинейное 7
— равномерное по окружности 12
— равноускоренное прямолинейное 9
Действнтельное изображенне 271
Действующне значення силы тока и напряження 241
Деление ядер 329
Детектор 254
Дефекты в крнсталлах 92
Деформацня 91
— пластнческая 92
— упругая 92
Джоуль 43
Днаграмма растяжения 91
Днамагнетнзм 184
Днламнка 14
Днод электровакуумный 173
— полупроводниковый 159
Днсперсия света 269
Днфракционная решетка 267
Днфракцня волн 230
— света 267
Диэлектрик 140
Диэлектрическая проницаемость 143
Длина волны 222
Доза ионизнрующего излучения 325
Домены 185
Донорные прнмеси 155
Дырка 155
Дырочные полупроводникн 156

Е

Единицы физнческнх величнн 351

Ж

Жесткость 29

З

Закон Бойля — Мариотта 81
— взаимосвязи массы и энергии 288
— всемирного тяготення 21, 23
— Гей-Люссака 82
— Гука 29
— Джоуля — Ленца 150
— инерции 15
— Кулона 131
— Ньютона, первый 15
— — второй 19
— — третий 20
— Ома для полной цепи 150
— — для участка цепи 147
— отражения волн 225
— преломлення волн 226
— радиоактнвного распада 323
— сложения скоростей, классическнй 7
— сложення скоростей, релятивистскнй 283
— сохранення импульса 41
— сохранення н превращення энергнн 51
— сохранення механнческой энергнн 49
— сохранення электрического заряда 129
— термоднламнкн, первый 95
— термоднламнкн, второй 105
— Шарля 82
— электромагнитной индукции 188



— электролиза 163
Законы фотоэффекта 300
Замедлитель 332
Заряд электрическнй 128
— электрона 167
— элементарный 167
— ядра 317
Затухающие колебания механические 219
— — электрнческие 235
Звук 223
Звуковые волиы 223

И

Идеальный газ 74
Изобара 82
Изобарный процесс 82
Изотерма 81
Изотермический процесс 81
Изотопы 315
Изотропность 88
Изохора 82
Изохорный процесс 81
Импульс силы 40
Импульс тела 40
Индуктивное сопротивленне 242
Индуктивность 190
Индуктор 196
Иидукция электромагннтная 187
Инертность 16
Ииерциальные снстемы отсчета 15
Интегральная схема 162
Интерференция волн 228
— света 266
Инфразвук 224
Инфракрасное излученне 278
Ионизация электронным ударом 169
— термическая 168
Искровой разряд 170
Искусственная радиоактивность 323
Испарение 85

К

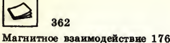
Камера Внльсона 327
Капиллярные явления 85
Катодные лучи 166
Кварки 289
Кельвин 78
Килограмм 17
Кииематика 4
Киинетическая энергия 44
Кипение 86
Когерентность 229
Колебания вынужденные 214
— гармоннческне 216
— затухающне 219
— механические 214
— свободные 214
— электромагнитные 231
Колебательный контур открытый 251
Колнчество вещества 73
— двнжения 40
— теплоты 96
Коллектор 196
Кондеисатор 143
Кондеисация 85
Коронный разряд 171
Корпускулярно-волновой дуализм 264
Коэффициеит трения 31
КПД тепловой машииы 103
Кристаллнческая решетка 90
Кристаллнческие тела 88
Крнтическая масса 330
— температура 87
Круговой процесс 103
Кулон 131

Л

Лазер 314
Линза 269
— рассеивающая 271
— собнрающая 270
Линнн магнитной индукцин 179
Линнн напряженности 134
Лупа 274
Луч 226

М

Магннтная запнсь звука 194
Магннтная запнсь ЭВМ 194
Магннтная индукция 177



Магнитное взаимодействие 176
— поле 176
Магнитный поток 187
Масс-спектрограф 319
Масса атомного ядра 318
— критическая 330
— молекул 73
— тела 16
Массовое число 317
Математический маятник 217
Материальная точка 4
Машииа постоянного тока 195
МГД-геиератор 182
Метод фотоэмульсий 329
Метр 5
Механика 4
Микропроцессор 163
Микроскоп 275
Микрофон 192
Микроэлектроника 162
Миимое изображение 271
Модель атома Резерфорда 309
Модуль упругости 91
Модуляция амплитудная 252
Молекулярио-кинетнческая теория 70
Молния 170
Моль 73
Молярная масса 73
Момент силы 33
Монокристаллы 88
Мощность 44
— излучения 261
— переменного электрического тока 241
— постояиного электрического тока 149

Н

Напряжение механическое 91
— электрическое 139
Напряжеиность электрического поля 133
Невесомость 25
Нейтрон 317
Необратнмость тепловых процессов 104
Несамостоятельный электрический разряд 167
Нуклон 318
Ньютои 18

О

Обратная связь 235
Однородное магнитное поле 176
— электрическое поле 135
Ом 148
Оптическая сила 272
Оптический квантовый генератор 315
Оптический центр 270
Опыт Милликеиа 166
— Резерфорда 308
— Франка и Герца 313
— Штерна 72
Освоение космоса 42
Основное состояние 311
— уравиение молекулярно-кинетической теории газов 74
Основные величииы 6
Осциллограф 175
Относительное удлинение 91
Отражение света 264
Очки 274

П

Пар иасыщенный 85
Параллельное соедииение проводников 131
Парамагнетнзм 184
Паровая машина 107
Паскаль 36
Первая космическая скорость 26
Перегрузка 25
Передача электрической энергии 245
Переменный электрический ток 237
Перемещенне 4
Период колебаний 216
— полураспада 323
Периодический закои Меиделеева 307
p-n-переход 157
Пи-мезон 318
Плазма 168
Пластическая деформация 92



Плечо силы 33
Побочная оптическая ось 270
Поверхностное натяжение 83
Позитрон 336
Показатель преломления 265
Поликристаллы 88
Полупроводники 153
Поляризация волн 231
— диэлектрика 142
— света 268
Последовательное соединение проводников 148
Постоянная Авогадро 73
— Больцмана 78
— Фарадея 165
Постулаты Бора 310
Поступательное движение 4
Потенциал 137
Поток излучения 261
Правило Ленца 187
Предел прочности 92
Преломление света 226
Примесная проводимость полупроводников 155
Принцип Гюйгенса 224
— Гюйгенса — Френеля 230
— относительности Галилея 280
— — Эйнштейна 280
— суперпозиции 134
— суперпозиции волн 227
Принципы радиосвязи 251
Проводники 140
Проекционный аппарат 274
Проекция скорости 9
— ускорения 9
Пузырьковая камера 328
Путь 4

Р

Работа в термодинамике 95
— выхода 301
— механическая 13
— сил электрического поля 136
— силы тяжести 45
— электрического тока 149
Рабочий цикл тепловой машины 103
Равновесие тел, имеющих ось вращения 32
— тел на опоре 35
— тепловое 76
Равнодействующая сила 20
Равномерное движение 7
Равноускоренное движение 8
Радиоактивность 308, 321
Радиоволны 258, 278
Радиолокация 260
Радиоприемник 253
Радиосвязь 251
Разность потенциалов 138
Разряд дуговой 171
— искровой 170
— коронный 171
— несамостоятельный 168
— самостоятельный 169
— тлеющий 171
— электрический 167
Реактивное движение 41
Реактор ядерный 331
Реакции термоядерные 333
— цепные 329
— ядерные 329
Резонанс механический 219
— электрический 244
Рентгеновские лучи 279
Ротор 196

С

Самоиндукция 190
Самостоятельный электрический разряд 167
Сверхпроводимость 152
Свободное падение тел 21
Свойства жидкостей 83
— *p-n*-перехода 157
— электромагнитных волн 249
— электромагнитных излучений 278
Секунда 5
Сила 16
— Ампера 177
— архимедова 37
— всемирного тяготения 23
— Лоренца 180
— поверхностного натяжения 83
— тока 146
— трения покоя 29



— — скольжения 30
— электродвижущая 150
Сильное взаимодействие 318
Силы упругости 28
Система отсчета 6
Скорость вторая космическая 28
— мгновенная 6
— первая космическая 26
— света 262
Сложение сил 20
Смачивание 84
Собственная проводимость полупроводников 154
Сопротивление электрическое 148
— — активное 240
— — емкостное 243
— — индуктивное 242
— — удельное 151
Спектральный анализ 277
Спектр линейчатый 277
— сплошной 269
— электромагнитных излучений 278
Спектроскоп 276
Спонтанное излучение 314
Статика 32
Статор 196
Стационарные состояния 310
Сторонние силы 147
Сцинтилляционный счетчик 327
Счетчик Гейгера 326

Т

Телевидение 255
Тело отсчета 6
Температура 75
— абсолютная 78
— кипения 86
— критическая 87
— Кюри 185
Теорема о кинетической энергии 45
Теория близкодействия 132
— дальнодействия 132
— относительности 280
Тепловая машина 101
— электростанция 238
Тепловое движение 71
Теплоемкость удельная 96
Теплоноситель 332
Теплота парообразования удельная 97
— плавления удельная 98
Термическая ионизация 168
Термодинамика 94
Термодинамический процесс 94
Термодинамическая система 94
Термометр 76
— газовый 77
— жидкостный 76
Терморезистор 156
Термоэлектронная эмиссия 172
Термоядерные реакции 332
Тесла 178
Точка росы 88
Траектория 4
Транзистор 159
Трансформатор 245
Турбина 112
— газовая 112
— паровая 108

У

Ультразвук 224
Ультрафиолетовое излучение 279
Управляющие стержни 332
Уравнение Менделеева — Клапейрона 80
— координаты при равноускоренном движении 12
— Эйнштейна 302
Уровни энергетические 312
Ускорение 8
— равноускоренного прямолинейного движения 8
— свободного падения 21
— центростремительное 12
Условия возникновения электромагнитных волн 231
— плавания тел 38
— равновесия тел 31

Ф

Фаза 216
Фарад 144
Ферромагнетизм 183



Фокальиая плоскость 270
Фокусиое расстояние 270
Формула линзы 272
— Томсона 234
Фотоаппарат 273
Фотоионизация 168
Фотон 301
Фоторезистор 157
Фотохимические процессы 305
Фотоэлемент 304
Фотоэффект 300

Х

Холодильиик 106

Ц

Цепная реакция деления ядер 329
Циклотрон 181

Ч

Частицы элементарные 333
Частота 13
— собствеиных колебаний контура 234
— циклическая 216

Э

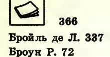
ЭДС индукции 188
Эквипотенциальная поверхиость 139
Электрическая емкость 143
— постоянная 131
Электрический заряд 128
— колебательный контур 231
Электрический ток 146
— — в вакууме 172
— — в газах 167
— — в металлах 151
— — в полупроводниках 153
— — в электролитах 163
Электрический разряд 167
— самостоятельный 167
— иесамостоятельный 167
Электрическое поле 132
— — вихревое 189
Электрификация 239
Электродвнгатель 197
Электродвнжущая сила 150
Электродинамическое взаимодействие 176
Электроизмерительные приборы 200
Электролиз 163
Электромагнитная индукция 186
Электрометр 129
Электрон 165
Электронвольт 169
Электронно-лучевая трубка 174
Электростатика 131
Электростатическая индукция 141
Электростатическое взаимодействне 131
Элементарный электрнческий заряд 165
Эиергетическая диаграмма 312
Эиергетические уровнн 312
Эиергия кинетическая 44
— магнитного поля 191
— механическая 49
— покоя 284
— связи атомного ядра 319
— электрнческого поля 146
— электромагнитных волн 261
Эффект Комптона 302

Я

Ядериая энергетика 332
Ядерные реакции 329
— силы 318
Ядерный взрыв 331
— реактор 331
Ядро атомное 317
Якорь 196

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Ампер А. 176
Басов М. Г. 315
Беккерель А. 308
Бойль Р. 81
Больцмаи Л. 79
Бор Н. 310



Бройль де Л. 337
Броун Р. 72

Гагарин Ю. А. 43
Галилей Г. 15
Ган О. 329
Гейгер Г. 326
Гейзенберг В. 317
Гей-Люссак Ж. 82
Гелл-Манн М. 336
Герц Г. Л. 313
Герц Г. Р. 248
Гершель В. 279
Гук Р. 29
Гюйгенс Х. 224

Демокрит 70
Джоуль Д. 150
Дирак П. 336

Жолио-Кюри И. 323
Жолио-Кюри Ф. 323

Иваненко Д. Д. 317
Иоффе А. Ф. 154

Кавендиш Г. 23
Камерлинг-Оннес Г. 152
Капица П. Л. 328
Карно С. 104
Кельвин (Томсон) У. 78
Клапейрон Б. 80
Коварски Л. 330
Королев С. П. 42
Кулон Ш. 37
Курчатов И. В. 332
Кюри П. 308

Лебедев П. Н. 303
Левкипп 70
Ленц Э. Х. 187
Ломоносов М. В. 70

Максвелл Д. 247
Мандельштам Л. И. 151
Мариотт Э. 81
Мейтнер Л. 329
Менделеев Д. И. 86, 307

Милликен Р. 166
Мозли Г. 317
Мюллер В. 279

Ньютон И. 19, 22

Ом Г. 147

Папалекси Н. Д. 151
Паскаль Б. 36
Перрен Ж. 72
Попов А. С. 251
Прохоров А. М. 315

Резерфорд Э. 308
Ремер О. 262
Рентген В. 280
Риттер И. 279

Склодовская-Кюри М. 308
Скобельцин Д. В. 328
Содди Ф. 308
Столетов А. Г. 300
Стоней Д. 165
Стюарт Т. 151

Тесла Н. 178
Толмен Р. 151
Томсон Дж. 166
Томсон (Кельвин) У. 78

Фабрикант В. А. 315
Фарадей М. 132
Ферми Э. 329
Франк Дж. 313
Френель О. 231
Фриш О. 329

Халбан Х. 330

Цвейг Дж. 336
Циолковский К. Э. 42

Чедвик Дж. 317

Шарль Ж. 82
Штерн О. 72
Штрассман Ф. 329

Эдисон Т. 172
Эйнштейн А. 283, 301
Эрстед Х. 176

Яблочков П. Н. 245

ЛИТЕРАТУРА

Балаш В. А. Задачи по физике и методы их решения.— М.: Просвещение, 1983.

Блудов М. И. Беседы по физике.— М.: Просвещение, 1984.— Ч. I; 1985.— Ч. II.

Григорьев В. И., Мякишев Г. Я. Силы в природе.— М.: Наука, 1984.

Енохович А. С. Справочник по физике и технике.— М.: Просвещение, 1983.

Кабардин О. Ф., Орлов В. А., Пономарева А. В. Факультативный курс физики. 8 класс.— М.: Просвещение, 1985.

Кабардин О. Ф., Кабардина С. И., Шефер Н. И. Факультативный курс физики. 9 класс.— М.: Просвещение, 1978.

Кабардин О. Ф., Орлов В. А., Шефер Н. И. Факультативный курс физики. 10 класс.— М.: Просвещение, 1979.

Китайгородский А. И. Физика для всех.— М.: Наука, 1979.— Кн. 3,4.

Ландау Л. Д., Китайгородский А. И. Физика для всех.— М.: Наука, 1978.— Кн. 1,2.

Марленский А. Д. Основы космонавтики. Факультативный курс.— М.: Просвещение, 1985.

Мухин К. Н. Занимательная ядерная физика.— М.: Атомиздат, 1969.

Мякишев Г. Я. Элементарные частицы.— М.: Просвещение, 1977.

Роджерс Э. Физика для любознательных. Пер. с англ.— М.: Мир, 1972.— Т. I.

Слободецкий И. Ш., Орлов В. А. Всесоюзные олимпиады по физике.— М.: Просвещение, 1982.

Спасский Б. И. Физика в ее развитии.— М.: Просвещение, 1979.

Тарасов Л. В. Мир, построенный на вероятности.— М.: Просвещение, 1984.

Тарасов Л. В. Этот удивительно симметричный мир.— М.: Просвещение, 1982.

Тульчинский М. Е. Качественные задачи по физике в средней школе.— М.: Просвещение, 1972.

Хрестоматия по физике / Под ред. Б. И. Спасского.— М.: Просвещение, 1982.

Элементарный учебник физики / Под ред. Г. С. Ландсберга.— М.: Наука, 1970.— Т. 2; 1971.— Т. 1; 1973.— Т. 3.

Учебное издание

КАБАРДИН Олег Федорович

ФИЗИКА

Справочные материалы

Зав. редакцией
В. А. Обменина

Редактор
Н. В. Филонович

Оформление
Ю. В. Самсонова

Художники
Т. М. Давыдова, Ю. А. Сайчук

Художественный редактор
В. М. Прокофьев

Технический редактор
М. М. Широкова

Корректоры *О. И. Кузовлева, Г. И. Мосякина*

ИБ № 12894

Подписано в печать с диапозитивов 26.09.90. Формат $60 \times 90^1/_{16}$. Бумага типограф. № 1. Гарнит. школьная. Печать высокая. Усл. печ. л. 23 + 0,25 форзац. Усл. кр.-отт. 23,69. Уч.-изд. л. 20,62 + 0,42 форзац. Тираж 2 000 000 экз. Заказ № 937. Цена 1 р.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Министерства печати и массовой информации РСФСР. 129846, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

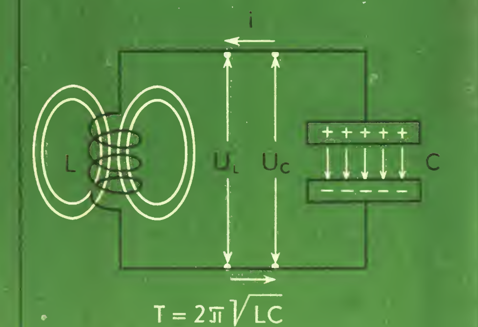
Саратовский ордена Трудового Красного Знамени полиграфический комбинат Министерства печати и массовой информации РСФСР. 410004, Саратов, ул. Чернышевского, 59.

СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

$$U_C = \frac{q}{C} \qquad U_C = -U_L \qquad -U_L = \mathcal{E}_{is} = -Li'$$

$$\frac{q}{C} = -Li' = -Lq''$$

$$q'' = -\frac{1}{LC}q \qquad q = q_0 \cos \omega t \qquad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$



$$T = 2\pi \sqrt{LC}$$

$$U_C = \frac{q_0}{C} \cos \omega t \quad i = q' = -\omega q_0 \sin \omega t$$

$$U_L = Li' = -\omega^2 L q_0 \cos \omega t$$

ИЗЛУЧЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА

$$\frac{v^2}{r} = \frac{F_k}{m} = k\frac{e^2}{mr^2} \qquad mvr = n\frac{h}{2\pi} \qquad r_n = \frac{n^2h^2\varepsilon_0}{\pi me^2}$$

3

$h\nu_{32}$

2

1

$h\nu_{31}$

r_1

r_2

r_3

$$E = h\nu \qquad \Delta E = E_m - E_n$$

E_4

E_3

E_2

E_1

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n \qquad \nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}$$

1 p.

